

ESTUDOS DE PROJETO E VERIFICAÇÃO À FADIGA DE PONTES MISTAS RODOVIÁRIAS

LUÍS MIGUEL PINTO DE MATOS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutora Elsa de Sá Caetano

Coorientador: Professor Mestre Miguel Ortega Cornejo

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

Para vencer – material ou imaterialmente – três coisas definíveis são precisas: saber trabalhar, aproveitar oportunidades, e criar relações. O resto pertence ao elemento indefinível, mas real, a que, à falta de melhor nome, se chama sorte.

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação constituiu, para mim, um importante marco a nível académico e pessoal, cuja realização não teria sido possível sem a ajuda de algumas pessoas e entidades às quais não poderia deixar de agradecer. Assim, deixo aqui expressos os meus sinceros agradecimentos:

- Ao Presidente da IDEAM S.A., Engenheiro Francisco Millanes Mato, ao Diretor Geral Luis Matute Rubio e ao Diretor de Engenharia Miguel Ortega Cornejo pela inigualável oportunidade de aprendizagem e formação proporcionada.
- Ao Chefe de Projeto e meu supervisor direto, Jorge Nebreda Sánchez pelos ensinamentos fundamentais transmitidos no âmbito do meu trabalho e fora dele, por toda a ajuda, paciência e disponibilidade demonstrada durante toda a minha estadia na IDEAM, e também por todas as conversas informais que sempre me permitiam conhecer um pouco mais da cultura e tradição Espanhola.
- A toda a equipa IDEAM, pela forma incrível como me receberam, pelas conversas, e por toda a atenção e preocupação demonstrada ao longo de toda a minha estadia em Madrid
- À Professora Elsa de Sá Caetano, por toda a ajuda e apoio dado ao longo deste período, pelos conselhos, disponibilidade e dedicação com que me acompanhou na realização deste trabalho.
- À Maria João por todo o apoio, companhia e ajuda dada durante esta etapa.
- À Dirce, Guida e Berta por toda a ajuda, carinho e simpatia com que me receberam e acompanharam durante a minha estadia em Madrid.

Deixo também os meus profundos agradecimentos à minha família e amigos, que me acompanharam e aconselharam, não só ao longo do período da realização deste trabalho, mas durante todo o meu percurso na FEUP:

- Aos meus pais, por toda a ajuda, apoio incondicional, e esforço dedicado que me permitiu agarrar esta oportunidade.
- Ao meu irmão Paulo, por todo o apoio e conhecimentos transmitidos, pelos conselhos e confiança depositada, e por constituir o exemplo de pessoa que sempre procurei seguir.
- À minha irmã Teresa e cunhado Paulo, por todo o carinho, companhia e ajuda dada ao longo deste percurso especialmente durante este último ano.
- Ao Bruno, por estar sempre presente em todas as etapas da minha vida e pela sua verdadeira amizade e companheirismo ao longo de todos estes anos.
- Ao José Neto, por todas as conversas e noites de estudo, pelos conselhos fundamentais e todo apoio dado ao longo do meu percurso na FEUP.
- Ao Carlos, Tiago, Luís, Rui, Vitor, Simão, João Castro e José Pimenta por me terem acompanhado ao longo destes 5 anos e contribuído com momentos inesquecíveis que guardarei para sempre na minha memória.
- Ao João Macedo e Yanick Varela, pela companhia, amizade e palavras de apoio nos momentos mais difíceis ao longo deste último ano na FEUP.

RESUMO

O principal objetivo desta dissertação consiste na análise global à fadiga, recorrendo a diferentes métodos de verificação de segurança, de um conjunto de 3 pontes mistas rodoviárias projetadas pela empresa espanhola IDEAM S.A, assim como a análise local de elementos críticos das tipologias seccionais mais comuns em função do número de vias de circulação do tabuleiro.

Numa primeira fase procede-se ao enquadramento histórico do fenómeno da fadiga assim como a fundamentação científica associada ao mesmo. Posteriormente são explicitadas as metodologias de análise a que se recorreu no âmbito da realização deste trabalho, nomeadamente o Método do dano acumulado e método simplificado baseado neste, Método da tensão equivalente de dano. Antes de se proceder à exposição dos resultados associados ao estudo de fadiga, é efetuada uma exposição do enquadramento do Método do dano acumulado na EN1993-2, assim como a explicitação detalhada do Método simplificado de análise à fadiga presente nesta norma, cuja base teórica é fornecida pelo Método da tensão equivalente de dano.

A primeira investigação assenta na análise à fadiga das secções críticas de centro de vão de 3 pontes mistas rodoviárias, pertencentes à tipologia caixão e bi-viga, projetadas pela empresa IDEAM S:A de acordo com a norma Espanhola em vigor na época, IAP98. Por forma a manter a coerência do enquadramento dos métodos de análise no âmbito do Eurocódigo, procedeu-se ao redimensionamento das secções de acordo com as ações presentes na EN1991-2. De seguida, efetuou-se uma dupla análise à fadiga, recorrendo a ambas a metodologias, da ligação transversal entre chapas de fundo pelo facto de constituir a ligação crítica. Os resultados desta análise apresentam-se sob a forma de tabelas e gráficos, contendo a categoria de pormenor necessária para que se cumpra a segurança, em função das intensidades de tráfego de veículos pesados presentes na EN1991-2. O mesmo procedimento é repetido, alargando-se o estudo a diversos comprimentos de vão, por forma a efetuar uma análise paramétrica e comparativa, não só entre métodos mas também entre as diferentes tipologias e diferentes comprimentos de vão estudados. Os resultados finais resultam da análise, através de ambas as metodologias, de 36 pontes mistas rodoviárias.

A segunda parte da investigação consiste no estudo dos elementos críticos de tipologias seccionais, que constituem as soluções usuais de tabuleiros de 2, 3 e 4 vias de circulação. Mediante o funcionamento de cada tipologia seccional, foram redimensionadas as secções críticas das secções transversais habituais, resultantes de tabuleiros de 3 e 4 vias de circulação, de acordo com as cargas prescritas na EN1991-2. Em cada um dos casos anteriores, foram atribuídas dimensões base, como altura da secção e largura de tabuleiro, adequadas e típicas destas soluções. No caso da tipologia de secção transversal com tabuleiro de 2 vias de circulação, apenas se estudam 2 casos concretos de projeto existente, sem proceder ao seu dimensionamento. A análise à fadiga é concretizada recorrendo ao Método do dano acumulado, analisando-se em cada caso estudado, as ligações soldadas das zonas críticas em função do funcionamento estrutural da secção transversal. Os resultados são apresentados em termos de dano para os pormenores, com pormenor único nas tabelas de classificação da EN1993-1-9, e em termos de categoria mínima para os pormenores cuja categoria depende das condições de execução.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga, pontes rodoviárias, dimensionamento, dano, categoria de pormenor,

ABSTRACT

The main purpose of this dissertation is to perform a fatigue analysis, using different methodologies, both from a global a local perspective, in three composite road bridges designed by IDEAM S:A., and a set of the most common cross sections depending on the deck width.

Firstly, an introduction and brief history of the phenomenon of fatigue will be presented, as well as the scientific theories and basic principles used to approach the phenomenon. A brief description of the theoretical information behind fatigue design methodologies, such as the Damage Accumulation Method and the Damage Equivalent Method, will also be included. A description of the fatigue assessment procedures prescribed in the EN1993 - 2, which is one of the norms used by IDEAM S:A., will also be presented.

The first part of the study conducted in this thesis consists on the fatigue analysis of the critical mid-span cross sections, of three road bridges with different cross sections (box girder and double beamed), designed by IDEAM S.A. according to the Spanish norm IAP98. In order to maintain the coherence of the results, these cross sections were redesigned using the loads prescribed in the norm EN1991-2. The fatigue methodologies are applied to the critical transversal welding connection between the lower metallic plates leading to a compilation of results in terms of detail category depending on the different heavy traffic intensities referred in the norm 1991-2. The referred procedure is applied to a set of new different span lengths, extending the study and allowing to compare the results not only between different bridge typology but also between fatigue assessment methods. The final results are obtained from the analysis, using both the Damage Accumulation Method and the Simplified Fatigue Assessment Method, of 36 composite road bridges.

The second and final part of this study aims to analyse the critical elements of composite bridge cross sections which represent the typical cross section solution for decks with 2, 3 and 4 traffic lanes. Depending on the different structural behaviour of the cross sections, the critical elements of cross sections for 3 and 4 traffic lanes, are designed accordingly to the loads prescribed in the EN1991-2 assuming typical dimensions for height and width. For the case of two traffic lanes cross section, it will only be studied two pre-defined cross sections with fixed dimensions. The fatigue analysis is conducted using the Damage Equivalent Method analysing the welded connections existing in the critical elements of each type of cross section. The results are presented in terms of damage when a detail is clearly defined on the detail classification tables, referred in the EN1993-1-9, and in terms of optimum detail category when it depends on the conditions of execution.

KEYWORDS: Fatigue, road bridges, design, damage, detail category.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. Introdução	1
1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DA TESE.....	3
2. Fadiga – enquadramento histórico, fundamento científico e conceitos fundamentais	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO – DE WÖHLER A PARIS.....	5
2.3 FUNDAMENTO CIENTÍFICO.....	6
2.3.1. FADIGA – DEFINIÇÃO	6
2.3.2. NATUREZA DO PROCESSO DE FADIGA – INICIAÇÃO, PROPAGAÇÃO E RUTURA.....	7
2.3.2.1 Nucleação ou iniciação da fissura.....	7
2.3.2.2 Crescimento e propagação controlada	8
2.3.2.3 Propagação descontrolada e rutura	9
2.3.3. FADIGA E MECÂNICA DA FRATURA.....	9
2.4 CURVAS DE WÖHLER (CURVAS DE RESISTÊNCIA À FADIGA)	12
2.5 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	14
2.5.1. VIDA ÚTIL	14
2.5.2. PORMENOR E CATEGORIA DE PORMENOR	15
2.5.3. CONCEITO DE DANO	15
2.5.4. OUTROS CONCEITOS.....	15
3. Metodologias de análise à fadiga	17
3.1 INTRODUÇÃO	17
3.2 MÉTODO DO DANO ACUMULADO	18
3.2.1. MÉTODOS DE CONTAGEM DE CICLOS.....	21

3.2.1.1 Método da gota de água (“ <i>Rainflow method</i> ”)	21
3.2.1.2 Método do reservatório (“ <i>Reservoir method</i> ”)	22
3.3 MÉTODO DA TENSÃO EQUIVALENTE DE DANO	23
3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS METODOLOGIAS DE ANÁLISE APRESENTADAS	24
 4. Análise segundo a regulamentação europeia	 27
4.1 INTRODUÇÃO	27
4.2 CATEGORIA DE TRÁFEGO E MODELOS DE CARGA DE FADIGA SEGUNDO A EN1991-2	28
4.3 FILOSOFIA DE DIMENSIONAMENTO – VIDA SEGURA V.S. DANO CONTROLADO	33
4.4 MÉTODO SIMPLIFICADO E ABORDAGEM DE CÁLCULO SEGUNDO A EN1993-2 E EN1993-1-9	34
4.5 CURVAS DE WÖHLER ADAPTADAS À REGULAMENTAÇÃO	39
4.6 CLASSIFICAÇÃO DE PORMENORES DE ACORDO COM A EN1993-1-9	41
 5. Análise global à fadiga de pontes mistas rodoviárias	 43
5.1 INTRODUÇÃO	43
5.2 ESTRUTURAS ANALISADAS	43
5.2.1. PONTE TRES CANTOS	43
5.2.2. PONTE FORNELLS	46
5.2.3. PONTE UTE – NUENO	48
5.3 ELEMENTOS E LIGAÇÕES ANALISADAS	51
5.4 REAJUSTE SECCIONAL DE ACORDO COM O EUROCÓDIGO	55
5.4.1. IAP98 V.S. EN1991-2	55
5.4.2. CRITÉRIOS DE REDIMENSIONAMENTO	57
5.4.3. EXEMPLO 1 – REDIMENSIONAMENTO DA SECÇÃO DE CENTRO DE VÃO DA PONTE TRES CANTOS	58
5.4.4. EXEMPLO 2 – REDIMENSIONAMENTO DA SECÇÃO DE CENTRO DE VÃO DA PONTE FORNELLS	63
5.4.5. EXEMPLO 3 – REDIMENSIONAMENTO DA SECÇÃO DE CENTRO DE VÃO DA PONTE UTE NUENO	67
5.5 ANÁLISE À FADIGA	72
5.5.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DO DANO ACUMULADO	72
5.5.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO SIMPLIFICADO DO EUROCÓDIGO 3 – PARTE 2	73
5.5.3. PONTES CAIXÃO ISOSTÁTICAS	74

5.5.3.1 Método do Dano Acumulado	74
5.5.3.2 Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2.....	80
5.5.3.3 Análise comparativa e influência da variação do comprimento do vão	85
5.5.4. PONTES CAIXÃO CONTÍNUAS DE 3 VÃOS	90
5.5.4.1 Método do Dano Acumulado	90
5.5.4.2 Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2.....	94
5.5.4.3 Análise comparativa e influência da variação do vão lateral face ao principal	97
5.5.5. PONTES BI-VIGA CONTÍNUAS DE 3 VÃOS	99
5.5.5.1 Método do Dano Acumulado	101
5.5.5.2 Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2.....	104
5.5.5.3 Análise comparativa da influência da variação do vão lateral face ao principal	106
5.6 CONCLUSÕES	108

6. Análise local à fadiga de secções transversais típicas de pontes mistas rodoviárias

6.1 INTRODUÇÃO	111
6.2 TIPOLOGIAS TRANSVERSAIS ESTUDADAS	111
6.2.1. SECÇÃO EM CAIXÃO COM TRAVESSA SUPERIOR NÃO ESCORADA.....	112
6.2.1.1 Descrição e caracterização	112
6.2.1.2 Funcionamento estrutural e elementos críticos	114
6.2.1.3 Critérios de modelação.....	115
6.2.2. SECÇÃO EM CAIXÃO COM TRAVESSA SUPERIOR ESCORADA.....	116
6.2.2.1 Descrição e caracterização	116
6.2.2.2 Funcionamento estrutural e elementos críticos	118
6.2.2.3 Critérios de modelação.....	119
6.2.3. SECÇÃO EM CAIXÃO SEM TRAVESSA SUPERIOR	120
6.2.3.1 Descrição e caracterização	120
6.2.3.2 Funcionamento estrutural e elementos críticos	123
6.2.3.3 Critérios de modelação.....	125
6.3 PORMENORES E CATEGORIAS DE PORMENOR	130
6.4 DIMENSIONAMENTO DE SECÇÕES DE ACORDO COM O EUROCÓDIGO	135
6.4.1. TRAVESSA SUPERIOR NÃO ESCORADA	135
6.4.2. TRAVESSA SUPERIOR ESCORADA	137

6.4.3. TRELIÇA INTERIOR.....	141
6.5 ANÁLISE À FADIGA.....	142
6.5.1. CONSIDERAÇÕES E CRITÉRIOS DE ANÁLISE À FADIGA.....	142
6.5.2. CÁLCULO DE TENSÕES	143
6.5.2.1 Propriedades mecânicas das secções.....	143
6.5.2.2 Tensões normais	143
6.5.2.3 Tensões tangenciais	144
6.5.3. SECÇÃO EM CAIXÃO COM TRAVESSA SUPERIOR NÃO ESCORADA.....	144
6.5.4. SECÇÃO EM CAIXÃO COM TRAVESSA SUPERIOR ESCORADA.....	153
6.5.5. SECÇÃO EM CAIXÃO SEM TRAVESSA SUPERIOR	157
6.6 CONCLUSÕES.....	160

7. Conclusões e desenvolvimentos futuros 163

7.1 CONCLUSÕES..... 163

7.1.1. DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS REALIZADOS..... 163

7.1.2. CONCLUSÕES GERAIS 165

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS..... 167

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 169

ANEXO A – RESULTADOS GERAIS DO CAPÍTULO 5

ANEXO B – TABELAS DE CLASSIFICAÇÃO DE PORMENORES DA EN1993-1-9

ANEXO C – PARECER DA EMPRESA IDEAM S.A.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Escorregamento entre planos devido a cargas cíclicas (Adaptado de Stephens et al. (2001))	8
Figura 2.2 – Representação esquemática da propagação de uma microfissura de fadiga (Adaptado de Stephens et al. (2001))	8
Figura 2.3 – Rutura de uma ligação transversal soldada de chapas metálicas.	9
Figura 2.4 – Modos de rutura por fadiga de um material (Adaptado de Branco et al. (1999))	9
Figura 2.5 – Valores de Y para diferentes casos de fissura (Adaptado de Stephens et al. (2001))	10
Figura 2.6 – Lei de Paris (Adaptado de Marques (2006))	11
Figura 2.7 – Curva de resistência à fadiga para tensões normais (Adaptado de Tembe (2001))	12
Figura 2.8 – Curva de resistência à fadiga para tensões tangenciais (Adaptado de Tembe (2001)) ..	14
Figura 3.1 – Histórico de tensões (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))	18
Figura 3.2 – Espectro de tensões (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))	19
Figura 3.3 – Ciclos até à rutura (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))	19
Figura 3.4 – Histórico de tensões rodado de 90° (Adaptado de Frýba (1996))	21
Figura 3.5 – Amplitudes de tensão reorganizadas depois da aplicação do Método da Gota de Água (Adaptado de Frýba (1996))	22
Figura 3.6 – Método do Reservatório (Adaptado de Ribeiro (2004))	23
Figura 3.7 – Histórico de tensões de amplitude constante (Adaptado de Brozzetti et al. (1996))	25
Figura 3.8 – Histórico de tensões de amplitude variável ordenado por blocos de amplitude constante (Adaptado de Branco et al. (1999))	25
Figura 4.1 - Cargas do Load Model 1 (Adaptado de EN1991-2 (2003))	29
Figura 4.2– Geometria do veículo de fadiga FLM3 (Adaptado de EN1991-2 (2003))	31
Figura 4.3 – Coeficiente λ_1 para zonas de centro de vão (Adaptado de EN1993-2 (2006))	36
Figura 4.4 - Coeficiente λ_1 para zonas de apoio (Adaptado de EN1993-2 (2006))	36
Figura 4.5 – Coeficiente λ_{\max} para zonas de centro de vão (Adaptado de EN1993-2 (2006))	38
Figura 4.6 - Coeficiente λ_{\max} para zonas de apoio (Adaptado de EN1993-2 (2006))	38
Figura 4.7 – Curvas de resistência para tensões normais em função da categoria de pormenor (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))	39
Figura 4.8 - Curvas de resistência para tensões tangenciais (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))	40
Figura 4.9 – Curva de resistência à fadiga para tensões tangenciais em conetores de pernos (Adaptado de EN1994-2 (2005))	40
Figura 4.10 – Exemplo de um elemento contínuo a) de uma ligação soldada b) e uma ligação aparafusada c) (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))	41

Figura 5.1 – Alçado da Ponte Tres Cantos	43
Figura 5.2 – Vista em planta da Ponte Tres Cantos	44
Figura 5.3 – Secção transversal em zona de apoio	44
Figura 5.4 – Secção transversal em zona de centro de vão	44
Figura 5.5 – Modelo da Ponte Tres Cantos em <i>SofiStik</i>	45
Figura 5.6 – Esquema de modelação das cargas excêntricas.....	45
Figura 5.7 – Aplicação das cargas do modelo FLM3 no modelo numérico	46
Figura 5.8 – Alçado da Ponte Fornells	46
Figura 5.9 – Vista em planta da Ponte Fornells	46
Figura 5.10 – Secção transversal da Ponte Fornells em zona de apoio.....	47
Figura 5.11 – Secção transversal da Ponte Fornells em zona de centro de vão.....	47
Figura 5.12 – Modelo em <i>SofiStik</i> da Ponte Fornells	48
Figura 5.13 – Alçado da Ponte Ute - Nueno.....	48
Figura 5.14 – Vista em planta da Ponte Nueno	49
Figura 5.15 – Secção transversal da Ponte Ute – Nueno em zona de apoio	49
Figura 5.16 – Secção transversal da Ponte Ute – Nueno em zona de centro de vão	49
Figura 5.17 – Modelo em <i>SofiStik</i> da Ponte Ute - Nueno	50
Figura 5.18 – Resposta da secção transversal mediante cargas excêntricas	50
Figura 5.19 – Cargas aplicadas na zona bi-viga. 51	
Figura 5.20 – Cargas aplicadas na zona em caixão	
Figura 5.21 – Representação das ligações soldadas longitudinais nas secções transversais (caixão e bi-viga)	52
Figura 5.22 – Representação em planta das ligações transversais soldadas	52
Figura 5.23 – Descrição do tipo de soldadura das ligações da alma do caixão e da célula superior à banzo superior (Adaptado de Freitas (2014)).....	53
Figura 5.24 - Descrição do tipo de soldadura das ligações da célula inferior à alma e à chapa de fundo do caixão (Adaptado de Freitas (2014))	53
Figura 5.25 – Descrição do tipo de soldadura das ligações na secção bi-viga (Adaptado de Freitas(2014))	54
Figura 5.26 – Exemplos de soldaduras transversais entre elementos de diferentes espessuras (Adaptado de Freitas (2014))	54
Figura 5.27 – Configuração do veículo pesado da IAP98 (esquerda) e EN1991-2 (direita).....	56
Figura 5.28 – Representação esquemática do binário de forças resistente gerado na secção transversal	59
Figura 5.29 – Linha de influência de R1	68

Figura 5.30 – Posição dos veículos pesados do modelo LM1 no tabuleiro.....	68
Figura 5.31 – Posição da UDL de acordo com a linha de influência de R1	68
Figura 5.32 – Histórico de momentos fletores na secção de abcissa igual a 25,75 metros da ponte Tres Cantos devido à atuação do veículo FLM3.....	74
Figura 5.33 – Curva S-N genérica para tensões normais (Adaptado de EN1993-1-9 (2010)).....	76
Figura 5.34 – Localização das secções transversais a analisar	90
Figura 5.35 - Histórico de momentos fletores na secção de abcissa igual a 10 metros da ponte Fornells devido à atuação do veículo FLM3	90
Figura 5.36 - Histórico de momentos fletores na secção de abcissa igual a 67,5 metros da ponte Fornells devido à atuação do veículo FLM3	91
Figura 5.37 – Binário de reação numa secção bi-viga mediante o carregamento excêntrico do veículo FLM3	99
Figura 5.38 - Histórico de momentos fletores na secção de abcissa igual a 15 metros da ponte Ute - Nueno devido à atuação do veículo FLM3.....	100
Figura 5.39 - Histórico de momentos fletores na secção de abcissa igual a 70 metros da ponte Ute - Nueno devido à atuação do veículo FLM3.....	100
Figura 6.1 – Secção transversal em caixão com travessa superior não escorada	112
Figura 6.2 – Distribuição em planta das travessas superiores	112
Figura 6.3 – Modelo adotado para a travessa superior não escorada	114
Figura 6.4 – Representação esquemática do fluxo de esforço rasante devido a cargas excêntricas	114
Figura 6.5 – Zona crítica da travessa superior não escorada.....	114
Figura 6.6 – Momento gerado pelo veículo de fadiga na ligação ao caixão metálico	115
Figura 6.7 – Representação esquemática da distribuição das cargas em planta entre travessas	115
Figura 6.8 – Modelo longitudinal representativo do afastamento em planta entre travessas consecutivas.....	115
Figura 6.9 – Modelos longitudinais com diferentes afastamentos tipo (4, 5, 6 e 8 m) entre travessas consecutivas.....	116
Figura 6.10 – Secção transversal em caixão com travessa superior escorada	117
Figura 6.11 – Zonas críticas da tipologia seccional em caixão com travessa superior escorada	118
Figura 6.12 – Representação esquemática do modelo desenvolvido	119
Figura 6.13 – Simulação da passagem transversal dos veículos.....	119
Figura 6.14 – Secção transversal em caixão sem travessa superior com 1 via de circulação	120
Figura 6.15 – Secção transversal em caixão sem travessa superior com 2 vias de circulação.....	121
Figura 6.16 – Pormenor da existência de conetores de perno apenas na banzo superior	121
Figura 6.17 – Exemplo de treliça tipo M.....	122
Figura 6.18 – Exemplo de treliça tipo W	122

Figura 6.19 – Pontos críticos do caixão metálico	124
Figura 6.20 – Perfis duplos unidos através de presilhas.....	124
Figura 6.21 – Pormenor da ligação das diagonais à chapa de Gusset	124
Figura 6.22 – Representação esquemática do sistema estrutural modelado	125
Figura 6.23 – Esquema do procedimento de cálculo usado para cargas excêntricas.....	126
Figura 6.24 – Carga transmitida ao caixão no caso de carga simétrica	126
Figura 6.25 – Carga transmitida ao caixão no caso de carga antissimétrica.....	127
Figura 6.26 – Modelo plano de uma treliça tipo M e W (esquerda e direita)	127
Figura 6.27 – Carregamento simétrico ($P = 50$ kN) e simulação do efeito de difusão longitudinal das cargas.	128
Figura 6.28 – Carregamento antissimétrico ($P' = 94,4$ kN) e aplicação das cargas de esforço rasante	128
Figura 6.29 – Difusão em planta das cargas transmitidas pelos veículos	129
Figura 6.30 – Pormenores de ligação da travessa superior não escorada ao caixão metálico	130
Figura 6.31 – Pormenores críticos na zona de ligação da escora à travessa superior	133
Figura 6.32 – Pormenor de ligação da escora metálica ao caixão e pormenor crítico	133
Figura 6.33 – Pormenor de ligação das diagonais à chapa de gusset (esquerda) e ligação entre perfis duplos (direita)	134
Figura 6.34 – Folha de cálculo em Excel desenvolvida para o cálculo de propriedades mecânicas .	143
Figura 6.35 – Esquema da área de corte usada para cálculo de tensões tangenciais	144
Figura 6.36 – Momento gerado pela resultante dos diferentes veículos do modelo FLM4	146
Figura 6.37 – Representação esquemática das tipologias de treliça interna.....	157

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Categorias de tráfego em função da tipologia de estrada (Adaptado de EN1991-2 (2003))	29
Tabela 4.2 - Características dos veículos pesados do LM2 (Adaptado de EN1991-2 (2003))	30
Tabela 4.3 - Definição geométrica das dimensões das rodas em função do tipo de eixo (Adaptado de EN1991-2 (2003)).....	31
Tabela 4.4 - Características dos veículos pesados-tipo do modelo de fadiga FLM4 (Adaptado de EN1991-2 (2003)).....	32
Tabela 4.5 - Coeficiente parcial de segurança γ_{Mf} (Adaptado de EN1993-1-9 (2010)).....	33
Tabela 5.1 – Classificação dos pormenores a analisar de acordo com a EN1993-1-9.....	55
Tabela 5.2 – Ações de sobrecarga rodoviária prescritas na IAP98 (1998)	56
Tabela 5.3 – Ações de sobrecarga rodoviária prescritas na EN1991-2 (2003).....	56
Tabela 5.4 – Comparação entre a norma IAP98 e EN1991-2	57
Tabela 5.5 – Resumo de esforços e esforços de dimensionamento	58
Tabela 5.6 – Resumo de cargas e sobrecargas aplicadas.....	60
Tabela 5.7 – Características da secção original e final	61
Tabela 5.8 – Tensões na fibra superior e inferior de acordo com sequência de aplicação de cargas ..	62
Tabela 5.9 - Resumo de esforços e esforços de dimensionamento	63
Tabela 5.10 – Resumo de cargas e sobrecargas aplicadas	65
Tabela 5.11 – Características da secção original e final	65
Tabela 5.12 - Tensões na fibra superior e inferior de acordo com sequência de aplicação de cargas ..	66
Tabela 5.13 - Resumo de esforços e esforços de dimensionamento	69
Tabela 5.14 – Resumo de cargas e sobrecargas aplicadas	70
Tabela 5.15 – Características da secção original e final	70
Tabela 5.16 - Tensões na fibra superior e inferior de acordo com sequência de aplicação de cargas ..	71
Tabela 5.17 – Oscilação de momentos fletores provocada por cada veículo na secção de controlo ..	75
Tabela 5.18 – Propriedades mecânicas da secção redimensionada	75
Tabela 5.19 – Intervalo de tensão provocada pelo veículo FLM3 e veículos pesados-tipo do modelo FLM4	76
Tabela 5.20 –Dano na ligação transversal de chapas de fundo assumindo categoria de pormenor de 71	78
Tabela 5.21 – Exemplo de cálculo de categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado	79
Tabela 5.22 – Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado	79

Tabela 5.23 – Coeficientes de dano para o veículo FLM3 e FLM4 em função da Intensidade de tráfego.....	83
Tabela 5.24 – Tensão de dano equivalente em função das diferentes intensidades de tráfego	83
Tabela 5.25 – Categoria mínima segundo o Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2.....	84
Tabela 5.26 – Características seccionais das secções de centro de vão para os diferentes comprimentos de vão	85
Tabela 5.27 – Esforços em ELU e oscilação de momento fletor em função do comprimento de vão .	86
Tabela 5.28 – Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado	86
Tabela 5.29 – Categoria mínima de acordo com o Método Simplificado do EC3 – Parte 2.....	87
Tabela 5.30 – Categoria mínima de acordo com o Método Simplificado do EC3 – Parte 2 livre da influência do coeficiente limitativo λ_{\max}	88
Tabela 5.31 – Comparação entre MDA e o M.S. do EC3 – Parte 2 usando o coeficiente λ_{\max} experimental	89
Tabela 5.32 – Oscilação de momento fletor causado por cada veículo de fadiga	91
Tabela 5.33 – Propriedades mecânicas da secção de vão lateral redimensionada	92
Tabela 5.34 - Propriedades mecânicas da secção de vão central redimensionada.....	92
Tabela 5.35 - Intervalo de tensões provocadas pelos veículos FLM3 e FLM4.....	92
Tabela 5.36 – Dano na ligação transversal de chapas de fundo de acordo com o Método do Dano Acumulado.....	93
Tabela 5.37 – Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado	93
Tabela 5.38 – Coeficientes parciais de dano para IMD de 0,5 milhões de veículos por ano e tráfego de longa distância do veículo de fadiga FLM4	94
Tabela 5.39 - Coeficientes de dano para o veículo FLM3 e FLM4 em função da Intensidade de tráfego	95
Tabela 5.40 - Tensão de dano equivalente em função das diferentes intensidades de tráfego.....	95
Tabela 5.41 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2	96
Tabela 5.42 - Oscilação de momento fletor causado por cada veículo de fadiga	101
Tabela 5.43 - Propriedades mecânicas da secção de vão central redimensionada.....	101
Tabela 5.44 - Propriedades mecânicas da secção de vão lateral redimensionada.....	102
Tabela 5.45 - Intervalo de tensão causada por cada veículo de fadiga.....	102
Tabela 5.46 - Dano na ligação transversal de chapas de fundo de acordo com o Método do Dano Acumulado	102
Tabela 5.47 - Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado	103
Tabela 5.48 - Coeficientes parciais de dano para IMD de 0,125 milhões de veículos por ano e tráfego de longa distância do veículo de fadiga FLM4	104

Tabela 5.49 - Coeficientes de dano para o veículo FLM3 e FLM4 em função da Intensidade de tráfego	104
Tabela 5.50 - Tensão de dano equivalente em função das diferentes intensidades de tráfego	105
Tabela 6.1 – Regras práticas para obtenção das principais dimensões dos elementos transversais	113
Tabela 6.2 - Regras práticas para obtenção das principais dimensões dos elementos transversais	117
Tabela 6.3 - Regras práticas para obtenção das principais dimensões dos elementos transversais	123
Tabela 6.4 – Classificação dos pormenores de ligação de acordo com a EN1993-1-9	131
Tabela 6.5 – Classificação dos pormenores de ligação de acordo com a EN1993-1-9	132
Tabela 6.6 – Classificação dos pormenores de ligação de acordo com a EN1993-1-9	133
Tabela 6.7 – Classificação dos pormenores de ligação de acordo com a EN1993-1-9	134
Tabela 6.8 – Exemplo de cargas e sobrecargas aplicadas para travessas afastadas em planta de 5 m	136
Tabela 6.9 – Características da secção de encastramento da travessa superior não escorada em função do afastamento em planta entre travessas consecutivas	137
Tabela 6.10 – Dimensões dos elementos principais da secção em caixão com travessa superior escorada	138
Tabela 6.11 – Exemplo de cargas e sobrecargas aplicadas para travessas afastadas em planta de 5 m	139
Tabela 6.12 - Características da secção de ligação da travessa superior escorada ao caixão em função do afastamento em planta entre travessas consecutivas	140
Tabela 6.13 - Características da secção central da travessa superior escorada em função do afastamento em planta entre travessas consecutivas	141
Tabela 6.14 - Características das escoras metálicas em função do afastamento em planta entre travessas consecutivas	141
Tabela 6.15 – Características seccionais de uma treliça tipo W e M com altura de 2,5m e 5 m de afastamento em planta	141
Tabela 6.16 – Reação máxima na travessa resultante da passagem dos diferentes veículos pesados do FLM4	145
Tabela 6.17 – Características seccionais da secção de encastramento de uma travessa superior não escorada com 4,75 m de comprimento e 5 m de afastamento em planta	147
Tabela 6.18 – Oscilações de tensões provocadas por cada veículo de fadiga	148
Tabela 6.19 – Ciclos atuantes de cada veículo tipo do modelo FLM4 assumindo a configuração de longa distância e uma IMD de 2 milhões de veículos pesados por ano	148
Tabela 6.20 – Tensões tangenciais na ligação de alma da travessa superior ao caixão	149
Tabela 6.21 – Reação máxima numa travessa em função do espaçamento entre travessas consecutivas devido à passagem dos diferentes veículos pesados	150
Tabela 6.22 – Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado	151

Tabela 6.23 – Dano na ligação do banzo superior e conetor de perno	152
Tabela 6.24 - Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado	154
Tabela 6.25 - Dano na ligação do banzo superior e conetor de perno	155
Tabela 6.26 - Dano na ligação do banzo superior, inferior e conetor de perno	156
Tabela 6.27 – Dano na ligação da escora metálica ao caixão de acordo com o Método do Dano Acumulado	157
Tabela 6.28 – Esforços na treliça tipo W	158
Tabela 6.29 – Esforços na treliça tipo M	158
Tabela 6.30 – Dano nos pormenores de diagonal e montante superior de acordo com o MDA	159
Tabela 6.31 - Dano nos pormenores de diagonal e montante superior de acordo com o MDA.....	159

1.

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

O fenómeno da Fadiga, em conjunto com a corrosão e desgaste, é uma das principais patologias na construção metálica. Se submetidas a determinadas condições de solicitação, as estruturas metálicas suscetíveis de serem afetadas por este fenómeno, podem ser conduzidas a roturas locais de elementos ou mesmo ao colapso global em prazos inferiores à sua vida útil, mesmo que o nível da solicitação se encontre abaixo da sua capacidade resistente.

No âmbito da Engenharia Estrutural, muitos estudos realizados nos anos 60 e 70 dedicados ao tema dos efeitos de solicitações cíclicas em estruturas metálicas permitiram desenvolver códigos e recomendações para o dimensionamento à fadiga, alterando substancialmente as recomendações e códigos de dimensionamento existentes. Os primeiros códigos na Europa a abordar esta temática foram a norma Alemã (DIN 15018, 1974), a norma Britânica (BS 5400-10, 1980) e a norma Americana AASHTO, sendo estas seguidas da primeira norma Europeia (ECCS, 1985) (Pravia, 2003).

Com o desenvolvimento da União Europeia e portanto dos seus estados membros, anteriormente detentores de realidades económicas e políticas distintas, uma nova dimensão de mercado e serviços surge em conjunto com a decisão de um futuro em comum. Este mercado é regulado através de produtos, testes e normas de dimensionamento standardizadas, constituindo toda uma família de produtos internacionais unificados e normalizados. Os Eurocódigos são um exemplo dessa família de produtos e, atualmente, é através deles que se processa o dimensionamento e verificação de segurança de todo o tipo de estruturas na maior parte dos estados membros. A Fadiga é um dos fenómenos alvo de análise e tratamento nesta documentação, nomeadamente nos Eurocódigos 3 e 4, respeitantes a estruturas metálicas e mistas, respetivamente.

O desenvolvimento de mercado decorrente desta expansão Europeia leva a uma necessidade de realização de trajetos cada vez mais longos e, conseqüentemente, a um maior volume de tráfego e peso dos veículos circulantes sobre as articulações rodoviárias, resultando na alteração da regulamentação de dimensionamento estrutural em vigor em diversos países. Espanha, na qualidade de estado membro da U.E., tem sido alvo deste incremento de intensidade rodoviária e, conseqüentemente as suas estruturas comunicantes, em grande parte pontes metálicas e mistas, têm inevitavelmente sido afetadas de maiores esforços e exigência estrutural. Esforços superiores originam maiores oscilações de tensão sobre estas estruturas, o que, associado ao considerável aumento de ciclos de carga, pode encurtar a vida útil devido a fenómenos de fadiga, albergando consigo fortes impactos sociais e económicos pelo eventual corte destas mesmas vias.

Assim, a preocupação por manter estas estruturas seguras e em boas condições de serviço durante a sua vida útil acarreta consigo uma maior necessidade de garantir um dimensionamento correto e eficaz das mesmas. Esta tarefa não tem sido fácil na realidade de projeto, devido não só devido à falta de clareza acerca da validade do campo de aplicação de algumas das indicações presentes nas normas atuais como o Eurocódigo 3 (EAE em Espanha), mas também devido às dúvidas quanto à segurança

de estruturas dimensionadas com códigos Nacionais anteriores em vigor aquando do seu dimensionamento, no caso de Espanha a RPX98.

É neste contexto que surge o interesse pelo desenvolvimento do presente trabalho na empresa sediada em Madrid, IDEAM S.A. A IDEAM S.A. é um dos principais protagonistas na conceção e dimensionamento de pontes rodoviárias metálicas e mistas, não só em Espanha, mas um pouco por todo o Mundo, pelo que os níveis de qualidade dos seus trabalhos aliados à sua vasta experiência nesta área de tecnologia levam ao desenvolvimento de estudos inovadores, destinados a melhorar a compreensão e tratamento de fenómenos danosos para as suas estruturas, que possam por em causa a sua qualidade e segurança, nomeadamente o fenómeno da Fadiga.

Com o estudo realizado e apresentado neste documento, em conjunto com o anterior estudo realizado por [Maria João Freitas], o objetivo final culmina na elaboração de um guia prático de dimensionamento e verificação de segurança à fadiga das tipologias de pontes metálicas e mistas rodoviárias mais comuns, que possa servir de apoio ao correto dimensionamento e verificação de segurança deste tipo de pontes quando sujeitas a este tipo de fenómeno.

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação, realizada em ambiente empresarial na empresa de projeto de pontes e estruturas especiais, IDEAM S.A. sediada em Madrid, assenta na análise à fadiga de pontes mistas rodoviárias recorrendo, não só ao Método do dano acumulado, mas também ao Método simplificado presente no Eurocódigo 3 – Parte 2. A análise que se pretende levar a cabo subdivide-se em duas grandes óticas, a primeira consistindo numa análise global de pontes mistas rodoviárias e a segunda numa análise local dos elementos críticos constituintes das secções transversais mais comuns neste tipo de estruturas.

A análise global consistirá, numa primeira instância, no estudo de um conjunto de três pontes mistas pertencentes às tipologias mais comuns, caixão e bi-viga, integrando a primeira tipologia uma ponte caixão isostática, e uma ponte caixão contínua de 3 vãos, e a segunda uma ponte bi-viga contínua de 3 vãos. As secções de vão central das estruturas referidas, serão reajustadas de acordo com as ações presentes no Eurocódigo 1 – parte 2, por forma a avaliar, não só se o dimensionamento das secções resultantes do dimensionamento em Estado Limite Último e Serviço é ou não condicionado pelo dimensionamento em Estado Limite Último de fadiga, mas também efetuar a comparação dos resultados obtidos entre o Método do dano acumulado e o Método simplificado do Eurocódigo 3 – parte 2. Esta análise global será, posteriormente expandida a diferentes comprimentos de vão. No caso das pontes caixão isostáticas, quatro comprimentos de vão típicos (20, 30, 45 e 60 m) serão estudados, no caso das pontes contínuas de 3 vãos, quatro comprimentos usuais de vão central (30, 45, 60 e 75) serão considerados, variando em cada um deles a proporção do comprimento do vão lateral relativamente ao vão central, de acordo com a gama de valores usuais, entre 60 a 100% do comprimento do vão central. Em cada caso, as secções serão também reajustadas por forma a avaliar o impacto da verificação de segurança à fadiga, assim como retirar ilações acerca da influência da variação, tanto do comprimento dos vãos principais, como da variação dos comprimentos dos vãos laterais. Os resultados obtidos serão alvo de uma análise comparativa em cada tipologia, por forma a avaliar a influência da variação do comprimento do vão lateral relativamente ao vão central. Será também efetuada uma análise comparativa entre as metodologias aplicadas, entre as tipologias de ponte estudadas, por forma a determinar qual das tipologias é mais afetada pelo fenómeno da fadiga.

Relativamente à análise local, pretende-se estudar à fadiga os elementos locais de 3 tipologias de secção transversal em função do número de vias de circulação, recorrendo-se ao Método do dano

acumulado. Serão estudados tabuleiros com larguras adequadas à existência de 2, 3 e 4 vias de circulação, sendo a secção materializada por uma secção em caixão sem travessa superior no primeiro caso, secção em caixão com travessa superior não escorada no segundo caso, e por último uma secção em caixão com travessa superior escorada. As tipologias seccionais a analisar cobrirão uma grande gama de soluções típicas de pontes mistas rodoviárias, residindo o propósito desta análise local em avaliar a ordem de grandeza do dano provocado pelas cargas de fadiga nos elementos críticos, determinando se o dimensionamento à fadiga pode ou não ser condicionante face ao dimensionamento em Estado Limite Último e Serviço.

Para além do referido nos dois parágrafos anteriores, dos estudos globais e locais resultarão exemplos numéricos concretos da aplicação das duas metodologias de análise à fadiga mencionadas, o Método do dano acumulado e o Método simplificado do Eurocódigo 3 - parte 2.

1.3 ORGANIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DA TESE

O conteúdo do presente trabalho foi organizado em 7 capítulos.

O primeiro capítulo consiste na descrição do contexto da realização desta dissertação, assim como os objetivos que se pretendem atingir.

O segundo capítulo resume o enquadramento histórico, o estado de arte, os conceitos fundamentais associados ao fenómeno da fadiga, por forma a facilitar a compreensão da exposição dos resultados obtidos.

O terceiro capítulo centra-se na descrição detalhada das metodologias de análise usadas no âmbito da realização do presente trabalho. As metodologias apresentadas são: o Método do dano acumulado, e o método simplificado baseado neste, Método da Tensão Equivalente de Dano. Para além do procedimento genérico de aplicação do Método do Dano Acumulado, são também explicitados os dois métodos de contagem de ciclos mais comuns na aplicação deste método, optando-se no entanto, por se fazer apenas uma breve descrição do Método da tensão equivalente de dano, uma vez que se detalha no capítulo seguinte o método simplificado presente no Eurocódigo 3 – Parte 2 cuja base teórica se centra no método anteriormente referido.

O quarto capítulo aborda as recomendações de cálculo presentes no Eurocódigo 3 - Partes 1-9 e 2, assim como a descrição dos modelos de cálculo a utilizar no âmbito de uma análise à fadiga segundo o Eurocódigo 1 – parte 2. Para além da descrição dos diferentes modelos de carga de fadiga, é também detalhada a aplicação do Método simplificado de análise à fadiga presente no Eurocódigo 3 – parte 2.

No quinto capítulo apresenta-se a análise global à fadiga de um conjunto de três pontes pertencentes às tipologias mais usuais, caixão e bi-viga, assim como um estudo paramétrico efetuado para diferentes comprimentos de vãos. O capítulo inicia com uma breve descrição de cada ponte analisada, os critérios de modelação usados de acordo com cada tipologia, caixão ou bi-viga, e os elementos e ligações críticas a serem analisadas. De seguida, procede-se à exposição, com exemplos numéricos, do reajuste seccional das secções originais de projeto de cada uma das pontes, de acordo com as ações presentes no Eurocódigo 1 – parte 2. Reajustadas as secções críticas, procede-se à análise à fadiga através do Método do dano acumulado e Método simplificado do Eurocódigo 3 – parte 2, avaliando-se o impacto dos resultados desta análise em cada caso estudado. O capítulo termina com uma análise comparativa entre os resultados obtidos através de ambas as metodologias de análise, para vários comprimentos de vão e proporções entre comprimentos de vão lateral e central.

O sexto capítulo é constituído pela análise local à fadiga de três tipologias seccionais. O capítulo principia com uma descrição de cada tipologia seccional estudada, assim como do seu funcionamento estrutural e critérios de modelação usados. Numa segunda fase, classificam-se e identificam-se as ligações críticas que serão alvo de análise, segundo as tabelas de classificação presentes no Eurocódigo 3 – parte 1-9. De seguida, e analogamente ao que foi efetuado no capítulo anterior, procede-se ao dimensionamento em Estado Limite Último para as tipologias seccionais em caixão com travessa superior escorada e não escorada, apresentando-se as respetivas características seccionais para as dimensões mais usuais neste tipo de elementos. Finalmente, o capítulo termina com a análise à fadiga em termos de dano e categoria de pormenor mínima de cada uma das ligações críticas consideradas.

Por último, apresenta-se o capítulo de conclusões, onde se sistematizam os principais resultados obtidos na análise global e na análise local de pontes mistas rodoviárias.

2.

2

FADIGA – ENQUADRAMENTO HISTÓRICO, FUNDAMENTO CIENTÍFICO E CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos e fundamentos teóricos relativos ao fenómeno da Fadiga. É no entanto importante referir que, devido à elevada abrangência e complexidade das teorias subjacentes ao tema, seria de todo inadequado e desenquadrado do âmbito deste estudo elaborar uma explicação exaustiva de todos os formalismos teóricos, pelo que apenas serão explicitados com maior pormenor os pontos relevantes e essenciais para uma boa compreensão do estudo apresentado nos capítulos seguintes.

2.2 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO – DE WÖHLER A PARIS

O fenómeno da Fadiga tem sido alvo de interesse desde há cerca de 170 anos (Séc. XIX). Este interesse remonta à época do motor a vapor, transporte mecânico e ao uso cada vez mais intensivo de componentes mecânicos. Esta mecanização significava que muitos componentes estariam sujeitos a condições de carga cíclica e o aparecimento de ruturas por fadiga começou a ser relativamente comum.

Os primeiros trabalhos realizados no âmbito da temática da Fadiga foram executados pelo Engenheiro de Minas Wilhelm Albert, que em 1829 observou, estudou e registou a rutura de correntes solicitadas ciclicamente com cargas de relativa baixa intensidade nas minas de ferro de Clausthal (Alemanha). O termo Fadiga associado à rutura de metais por propagação de fissuras viria a ser utilizado nos estudos de Braithwaite (1854), contudo este referiu nos seus trabalhos que o termo teria sido introduzido por um Mr. Field. Também se atribui crédito pela introdução deste conceito a Poncelet (1939), que se pensa ter referido este termo durante uma aula sua em Metz (Suresh, 1998) (Bathias, 2010).

Com a intensificação do uso do ferro como material de construção de estruturas metálicas, especialmente de pontes ferroviárias, o interesse por este assunto foi crescendo progressivamente. O primeiro estudo oficial surgiu na sequência daquele que viria a ser na época, um dos acidentes mais catastróficos da história na época, causado por fadiga, o acidente ferroviário de Versailles (1842). Este acidente causou a morte a 60 pessoas, tendo sido provocado pela rutura por fadiga de um eixo frontal da locomotiva. O acidente deu-se quando o conjunto ferroviário regressava a Paris após as celebrações do Rei Louis Philippe I no Palácio de Versailles. O descarrilamento da locomotiva, provocado pela

rutura de um eixo frontal, levaria à destruição completa do conjunto e consequentemente à perda de vidas humanas (Smith, 1990).

Em 1858, August Wöhler, protagonizou e publicou os primeiros ensaios oficiais à fadiga em provetes de laboratório, tanto em provetes planos como perfurados. Wöhler construiu diversos equipamentos para levar a cabo as suas experiências, e o seu procedimento focava-se essencialmente em aplicar diferentes intensidades de cargas cíclicas de amplitude constante e registar o número de ciclos que estes resistiam. Os seus estudos levaram à caracterização de comportamento à fadiga de metais e em 1870 foi publicado um relatório final contendo as principais conclusões dos ensaios elaborados até então, conhecidas como as Leis de Wöhler. A contribuição de Wöhler para a compreensão e tratamento da Fadiga revelou-se de uma importância extrema pois os seus estudos levaram à elaboração das curvas S-N, denominadas também de curvas de Wöhler em sua homenagem, base de tratamento atual de problemas de fadiga. Também foi Wöhler que estabeleceu alguns conceitos fundamentais como o de tensão limite de fadiga definido por um valor de tensão abaixo da qual não se poderia provocar a rutura do material independentemente da quantidade de ciclos de carga aplicados (Branco et al. 1999) (Suresh, 1998) (Bathias, 2010).

Também Inglis e Griffith contribuíram fortemente para o fundamento teórico e matemático do ponto de vista quantitativo da fratura frágil em sólidos, Inglis pela sua análise de tensões (1913) e Griffith pelo seu conceito energético (1921) (Suresh, 1998).

No início do século XX, o aço passa a ser um material competitivo e massivamente utilizado na construção industrial e de pontes e, portanto, verifica-se um grande desenvolvimento científico-tecnológico durante esta época originando uma grande quantidade de dados experimentais relacionados com a resistência de diversos tipos de peças com diferentes características que foram posteriormente usados por Palmgren (1924) e Miner (1945) para desenvolver modelos de dano acumulado por forma a prever a rutura de elementos por fadiga (Branco et al., 1999) (Suresh, 1998).

Mais tarde em 1957, Irwin demonstrou que a amplitude da singularidade de tensões na extremidade de uma fenda poderia ser expressa em termos de um escalar matemático conhecido como Fator de Intensidade de Tensões, K (Suresh, 1998).

Por fim, e já no início daquilo que representa a era moderna da mecânica da fratura, Paris e Erdogan foram os primeiros a sugerir que a velocidade de propagação de fendas por fadiga por ciclo de tensão, da/dN , poderia ser correlacionada com a amplitude do Fator de Intensidade de Tensões, K (Branco et al., 1999) (Suresh, 1998).

2.3 FUNDAMENTO CIENTÍFICO

2.3.1. FADIGA – DEFINIÇÃO

A palavra fadiga deriva do latim *Fatigare* – Fatigar, que significa causar ou sentir cansaço. Em termos de Engenharia, este termo pode ser definido segundo duas grandes perspetivas. A primeira, a perspetiva da ciência de laboratório, em que a Fadiga é descrita e caracterizada do ponto de vista microscópico e ao nível da ligação entre as partículas que constituem o material, envolvendo portanto descrições e fenómenos que ocorrem ao nível atómico. A segunda, a perspetiva da engenharia, em que a Fadiga representa o desenvolvimento e propagação de fissuras visíveis a olho nu, que podem levar à rutura da estrutura.

O fenómeno da Fadiga é conhecido na literatura, como o processo de alteração permanente progressivo e localizado de um material sujeito a condições de solicitação que produzem oscilações de tensões e deformações num ponto ou vários pontos (Branco et al., 1999), que podem culminar na formação de fendas ou rutura total do elemento após um determinado número de oscilações, ainda que a intensidade de carga da solicitação esteja abaixo do limite resistente elástico do material. Dito de outra forma, Fadiga é o mecanismo através do qual se desenvolvem fendas numa estrutura decorrente do intervalo de tensões provocada pela solicitação a que a esta está sujeita, podendo levar ao colapso local ou mesmo global. Por exemplo, uma fina vara de metal pode ser conduzida à rotura por fadiga se dobrada forma cíclica, ocorrendo a rotura após um determinado número de ciclos de “dobragem”.

A rutura por Fadiga normalmente ocorre quando a secção transversal reduzida é incapaz de resistir aos esforços atuantes. O desenvolvimento de fendas apenas ocorre sob a influência de carregamentos flutuantes pelo que estruturas sujeitas apenas a carregamentos estáticos ou pouca oscilação tensional não experimentam este fenómeno.

2.3.2. NATUREZA DO PROCESSO DE FADIGA – INICIAÇÃO, PROPAGAÇÃO E RUTURA

O mecanismo de rutura de fadiga em metais, tal como referido anteriormente toma diferente complexidade quando observado a partir de diferentes escalas. De um ponto de vista macroscópico o mecanismo de rutura de fadiga em provetes metálicos com superfície lisa é bastante simples mas quando observado a um nível microscópico, este torna-se bastante mais complexo.

Este mecanismo pode subdividir-se em três estados (Branco, 1999):

- Nucleação ou iniciação da fenda;
- Crescimento lento e propagação controlada;
- Propagação descontrolada e rutura.

O aparecimento de fissuras pode estar relacionado apenas com fenómenos de fadiga, ou pode ser originado por determinados processos de tratamento de superfície, manuseamento, defeitos de fabrico ou processos de soldadura em ligações, levando neste segundo caso a que a fase de iniciação da fenda seja inexistente e tendo como consequência um encurtamento do número de ciclos resistentes do material pelo rápido desenvolvimento das fissuras (Branco et al., 1999).

2.3.2.1 Nucleação ou iniciação da fissura

A origem da fenda de fadiga pode ser mais ou menos clara, estando no entanto diretamente relacionada com a intensidade das tensões aplicadas e, portanto, pontos de defeito ou irregularidades geométricas que provoquem concentração de tensões, são a sua origem mais provável. Em peças planas contínuas ou perfuradas submetidas a pequenos ciclos de oscilação tensional, a fase de iniciação da fissura ocupa cerca de 90% da vida útil do elemento (Branco et al., 1999). Normalmente a nucleação da fenda encontra-se confinada a uma pequena região de concentração de tensões, acumulando dano progressivamente até se formarem microfissuras que podem desenvolver-se mais ou menos de forma independente até culminarem na formação de uma fissura dominante.

Apesar da rutura por fadiga ocorrer sob a ação de cargas inferiores à resistência elástica do material e, portanto, não causar plastificação global, ocorrem fenómenos de microplastificação local nas superfícies livres do material onde as tensões são superiores devido à falta de confinamento dos grãos que constituem o material. Esta microplastificação local ocorre devido ao escorregamento relativo entre planos atômicos dos grãos, originando irregularidades superficiais definidas por intrusões e

extrusões e apelidadas de *Slip Bands*. É nestas *Slip Bands*, que se iniciam as microfissuras iniciais, propagando-se e avançando lentamente a cada ciclo de aplicação de carga (Branco et al., 1999) (Stephens, 2001). Na Figura 2.1 encontra-se representado esquematicamente o escorregamento entre planos atômicos dos grãos.

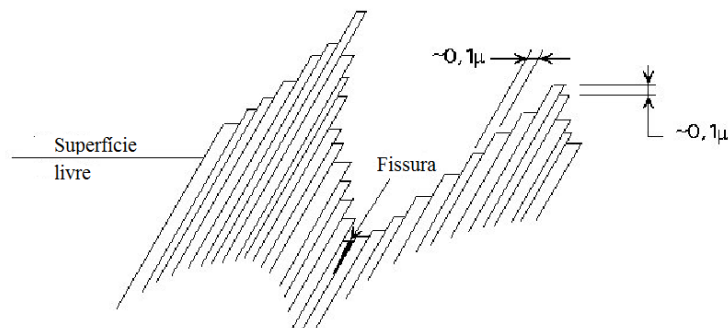


Figura 2.1 – Escorregamento entre planos devido a cargas cíclicas (Adaptado de Stephens et al. (2001))

2.3.2.2 Crescimento e propagação controlada

A propagação de uma fenda de fadiga pode ser definida em duas fases. De forma simplificada, numa primeira instância denominada por crescimento em *Shear mode*, a velocidade de crescimento da fissura é muito lenta sendo a direção orientada mais ou menos a 45 graus com o sentido de aplicação da carga, ou seja, na direção das tensões tangenciais máximas, desenvolvendo-se numa segunda fase ortogonalmente à direção de aplicação da carga, de forma controlada mas com velocidade superior (Figura 2.2) (Stephens, 2001) (Branco et al., 1999). Estas duas instâncias são na verdade englobadas numa só fase caracterizada pela propagação controlada da fissura encontrando-se ao abrigo de todos os princípios matemáticos da mecânica da Fratura onde são válidos os princípios de análise elástica do material.

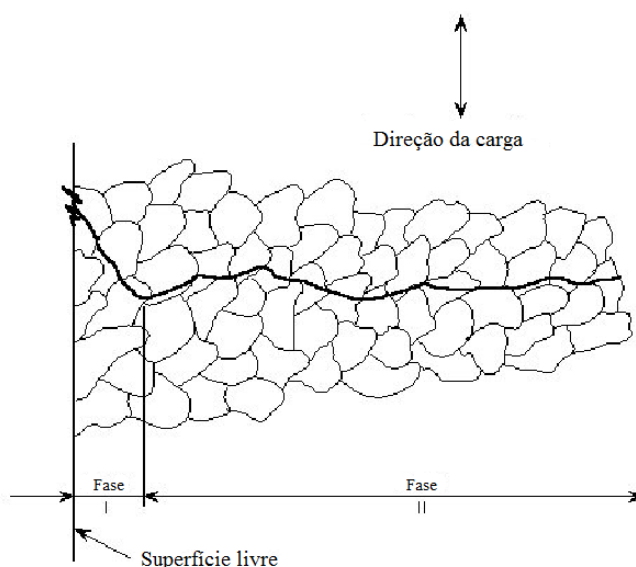


Figura 2.2 – Representação esquemática da propagação de uma microfissura de fadiga (Adaptado de Stephens et al. (2001))

2.3.2.3 Propagação descontrolada e rutura

Por último e mediante a contínua aplicação de carregamentos cíclicos, a fissura dominante atinge dimensões consideráveis, aumentando de forma descontrolada. Quando esta propagação da fissura acarreta já consigo uma perda considerável de secção, o elemento sofre fatalmente uma rutura estática devido à insuficiente resistência da secção útil. A Figura 2.3 mostra um exemplo de uma rutura por fadiga.

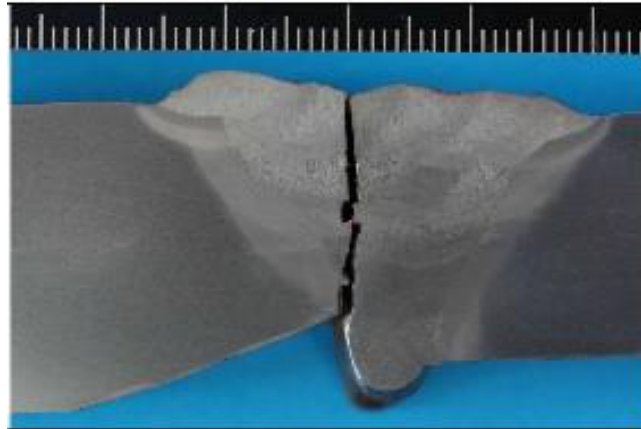


Figura 2.3 – Rutura de uma ligação transversal soldada de chapas metálicas.

2.3.3. FADIGA E MECÂNICA DA FRATURA

A Mecânica da Fratura não fornece qualquer informação acerca dos processos envolvidos na propagação das fissuras de Fadiga, mas sim o fundamento descritivo e as ferramentas matemáticas necessárias à sua caracterização para que os problemas práticos de Engenharia possam ser resolvidos. (Pook, 2007). Explicitamente, a Mecânica da Fratura aplicada ao estudo da Fadiga está relacionada com a análise da intensidade de tensões localizadas na extremidade de uma fissura e a velocidade de propagação da mesma em função do intervalo de tensões, tamanho da fissura, geometria e condições de contorno do elemento estudado (Branco et al., 1999).

Uma vez que o elemento chave da Mecânica da Fratura consiste no estudo do que se passa na extremidade da fissura, é importante introduzir o conceito de deslocamento superficial da fissura e Fator de Intensidade de Tensões.

Se um corpo fissurado for submetido a um carregamento, a zona fissurada sofre deslocamentos relativos em concordância com esse tipo de carregamento, que podem ser classificados em 3 modos distintos, Modo I, 2, 3 (Figura 2.4) (Branco, 1999).

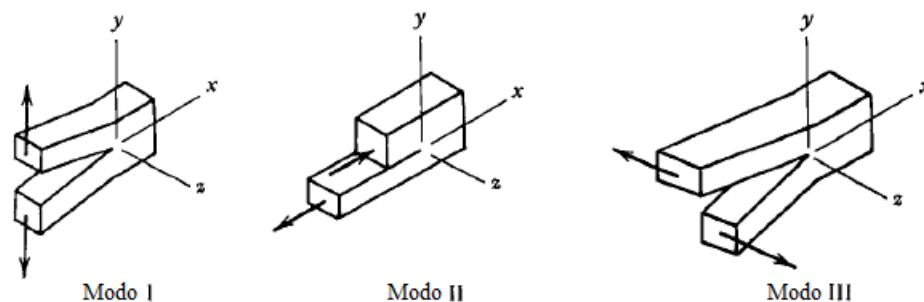


Figura 2.4 – Modos de rutura por fadiga de um material (Adaptado de Branco et al. (1999))

O Modo 1, decorrente de um carregamento normal à fissura, é conhecido como modo de abertura e o mais corrente em fissuras de fadiga, pressupondo o afastamento das duas superfícies na direção paralela ao eixo vertical Y (Figura 2.4). O Modo 2, decorrente de tensões tangenciais, é definido pelo escorregamento na direção do eixo longitudinal X (Figura 2.4). Por fim, o Modo 3 caracteriza-se pelo deslocamento relativo em sentidos opostos das faces de fratura (Figura 2.4).

Estes modos de deslocamento superficial da fissura constituem a base para descrever qualquer tipo de fenda, e também caracterizar o tipo de fissuração decorrente do fenómeno da Fadiga. A cada um destes modos está associado um campo elástico de tensões tipo, e um fator de intensidade de tensões distinto. O modo de rutura mais comum é o modo 1, sendo a contribuição dos restantes modos e dos respetivos fatores de intensidade de tensões pouco significativa na maioria dos casos práticos de Engenharia. O Fator de intensidade de tensões, para o caso geral, é dado pela equação (2.1) (Branco et al., 1999),

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.1)$$

Em que, Y é um fator adimensional dependente da geometria, σ a tensão aplicada e a o comprimento da fissura. O parâmetro Y pode ser obtidos através de ábacos como os da Figura 2.5.

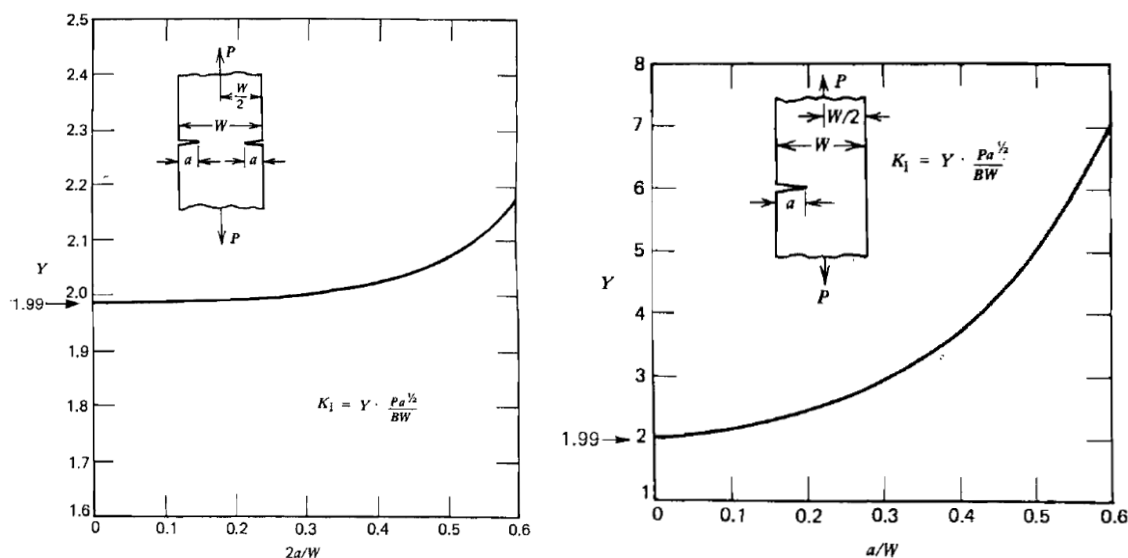


Figura 2.5 – Valores de Y para diferentes casos de fissura (Adaptado de Stephens et al. (2001))

O Fator de intensidade de tensões pode ser descrito como um parâmetro, que reflete a redistribuição de tensões num corpo, devido à introdução de uma fenda, revelando o modo de rutura e magnitude da transmissão de força através da vizinhança da extremidade da fissura. (Branco et al., 1999).

À medida que o comprimento da fissura aumenta, e consigo o respetivo fator de intensidade de tensões, é expectável que se atinja a rutura para um determinado valor de K. Este valor constitui o valor crítico, K_c , que conduz à propagação descontrolada e consequentemente à rutura por fadiga. Esta propriedade depende da tenacidade do material e pretende representar a resistência que este oferece à propagação de fissuras (Branco et al., 1999).

O crescimento de fissuras de fadiga pode ser caracterizado experimentalmente, aplicando ciclos de amplitude constante a provetes, avaliando a progressão de uma fissura prévia existente. Derivando a curva experimental obtida obtém-se uma nova relação, da/dN , que representada em escala logarítmica apresenta a configuração da curva da imagem da Figura 2.6 (Branco et al. 1999).

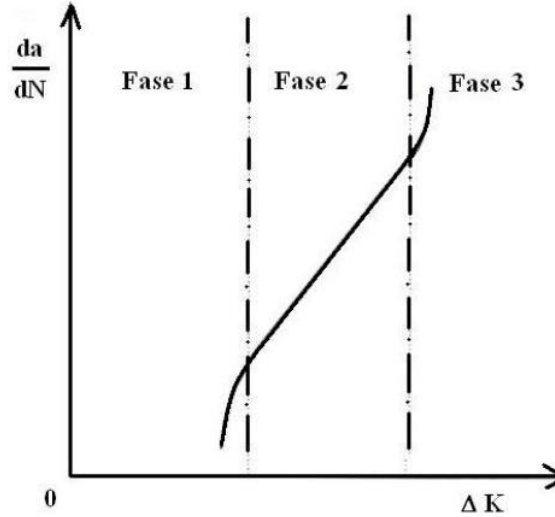


Figura 2.6 – Lei de Paris (Adaptado de Marques (2006))

A curva representada na Figura 2.6, é definida por três regiões distintas, sendo a primeira caracterizada por velocidades de propagação muito reduzidas, em que é possível definir um limite abaixo do qual não se verifica propagação alguma. A segunda região, é definida aproximadamente por uma reta, cuja aproximação empírica foi sugerida por Paul Paris, sendo esta lei dada pela equação (2.2) (Branco et al. 1999),

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (2.2)$$

Em que C e m são constantes que dependem do material variando com a tensão média, frequência, temperatura e meio ambiente.

A última região corresponde à propagação descontrolada da fissura conduzindo à rutura.

A lei empírica sugerida por Paris, constitui a primeira relação, obtida experimentalmente, entre da/dN e ΔK , sendo ΔK dado pela expressão (2.3),

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2.3)$$

Em que, K_{max} e K_{min} , correspondem aos fatores de intensidade de tensão obtidos para a tensão máxima e mínima num ciclo de carga, respetivamente (Branco et al., 1999).

Se o comprimento inicial da fissura assim como o seu comprimento crítico forem conhecidos, a lei de Paris pode ser integrada obtendo-se o número de ciclos resistentes, dado por (2.4),

$$N = \int_{a_i}^{a_{cr}} \frac{da}{C \cdot (\Delta K)^m} \quad (2.4)$$

O resultado desta integração resulta na expressão (2.5),

$$N = \frac{a_i^{1-\frac{m}{2}} - a_{cr}^{1-\frac{m}{2}}}{C \cdot \left(\frac{m}{2} - 1\right) \cdot Y^m \cdot \Delta\sigma^m \cdot \pi^{m/2}} \quad (2.5)$$

Em que, conhecendo o comprimento inicial e crítico da fissura, as contantes de material C e m, assim como o coeficiente Y retirado de ábacos como o da Figura 2.5, é possível simplificar a expressão, que mediante a aplicação de logaritmos resulta na equação (2.6) (Branco et al., 1999),

$$\log N = \log a - m \cdot \log(\Delta\sigma) \quad (2.6)$$

Esta expressão constitui a base das curvas da resistência à fadiga presentes na norma EN1993-1-9, as curvas de Wöhler.

2.4 CURVAS DE WÖHLER (CURVAS DE RESISTÊNCIA À FADIGA)

As curvas de Wöhler correspondem na sua essência à relação gráfica entre a intensidade do intervalo de tensão de amplitude constante (S), e o número de ciclos necessários para provocar a rutura por Fadiga (N).

Estas curvas são obtidas através de ensaios experimentais, provocando-se a rutura de determinados pormenores mediante a aplicação de oscilações de tensões de amplitude constante. A curva é geralmente aproximada através da relação analítica referida na secção anterior.

A norma EN1993-1-9 apresenta as curvas de resistência à fadiga, tanto de tensões normais como tensões tangenciais de diversos pormenores de ligações soldadas, como escrito em mais pormenor no Capítulo 4. A Figura 2.7 ilustra a configuração típica de uma curva genérica para tensões normais em dupla escala logarítmica.

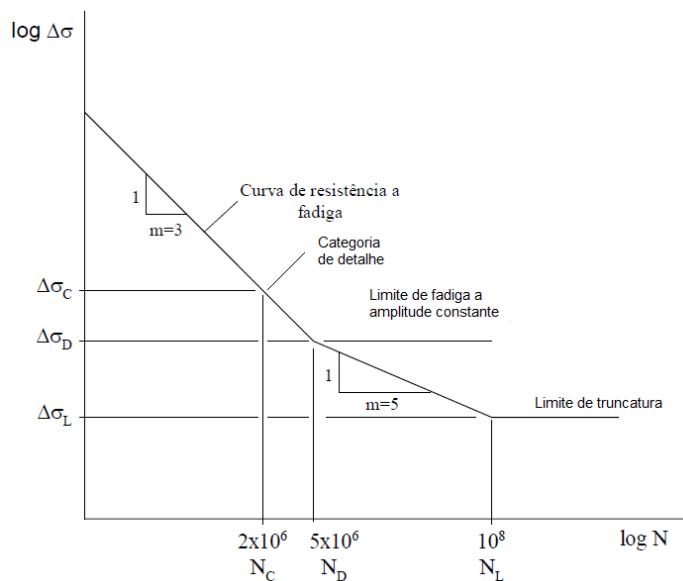


Figura 2.7 – Curva de resistência à fadiga para tensões normais (Adaptado de Tembe (2001))

As amplitudes de tensão representadas na Figura 2.7 assentam nas seguintes definições:

- $\Delta\sigma_c$ – Corresponde ao valor de referência de resistência à fadiga correspondente aos 2 milhões de ciclos. Esta é a definição usada como Categoria de pormenor.
- $\Delta\sigma_D$ – Corresponde ao limite de fadiga sob tensão constante. Se todas as oscilações de tensão normal forem inferiores a este limite, não se verificará rutura por fadiga independentemente do número de ciclos aplicados. Por outro lado, se se verificarem oscilações de tensões com valor superior e inferior a este limite, as tensões de valor superior a, $\Delta\sigma_D$ conduzirão à propagação da fenda de fadiga ou provocarão um defeito inicial. Assim, as oscilações de tensões com valores inferiores a este limite, produzirão também dano e contribuirão para a propagação da fissura. Este efeito é tido em conta através da zona de dano morada entre os 5 e os 100 milhões de ciclos resistentes. A contribuição para o dano de oscilações de tensão inferiores a, $\Delta\sigma_D$, não é no entanto infinita pelo que abaixo de um determinado valor, neste caso $\Delta\sigma_L$, não terão qualquer contribuição, designando-se este limite por limite de truncatura (“Cut-off-limit”).
- $\Delta\sigma_L$ – Corresponde ao limite de truncatura da curva de resistência do pormenor.

Como se pode observar na Figura 2.7, a curva é constituída por 3 troços distintos. Sabendo que em cada troço se mantém válida relação (2.7) (Brozzotti et al., 1996),

$$\Delta\sigma_1^m \cdot N_1 = \Delta\sigma_2^m \cdot N_2 \quad (2.7)$$

Os 3 troços constituintes da curva são definidos pelos seguintes intervalos,

- Para $N \leq 5 \cdot 10^6$;

$$\Delta\sigma_R^3 \cdot N_R = \Delta\sigma_c^3 \cdot 2 \cdot 10^6 \quad (2.8)$$

- Para $5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$;

$$\Delta\sigma_R^5 \cdot N_R = \Delta\sigma_D^5 \cdot 5 \cdot 10^6 \quad (2.9)$$

e

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \cdot \Delta\sigma_c \quad (2.10)$$

- Para $N \geq 10^8$;

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \cdot \Delta\sigma_D \quad (2.11)$$

As curvas de resistência à fadiga no caso das tensões tangenciais apresentam-se em tudo similares à curva anteriormente apresentada, residindo a única diferença na ausência do troço de $m=3$, tal como se pode observar na Figura 2.8.

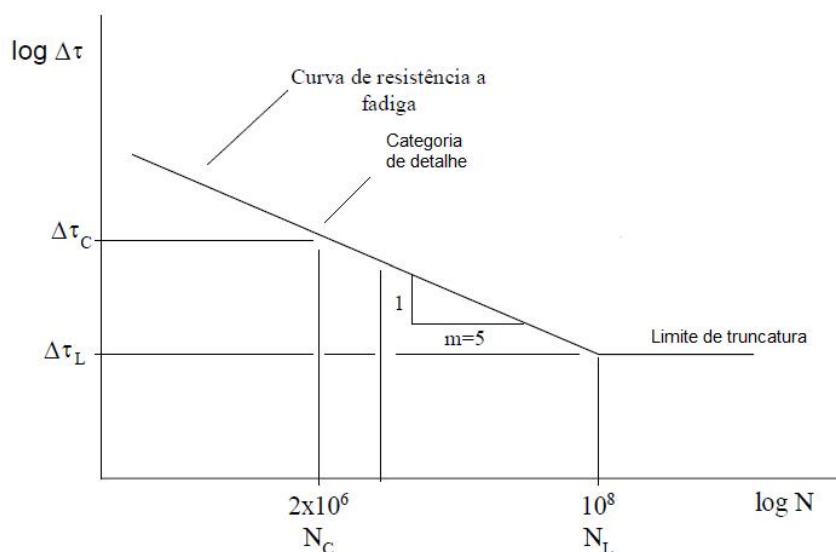


Figura 2.8 – Curva de resistência à fadiga para tensões tangenciais (Adaptado de Tembe (2001))

2.5 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Estando exposto de uma forma global o fundamento teórico que compõe o fenómeno da fadiga, serão abordados nesta secção os conceitos fundamentais envolvidos no cálculo prático de problemas de Engenharia, segundo a regulamentação atual.

2.5.1. VIDA ÚTIL

Qualquer estrutura projetada segundo as normas e códigos de dimensionamento, pressupõe uma série de cálculos e verificações por forma a assegurar o correto desempenho, tanto em estados limites últimos de resistência como de funcionamento em serviço por um determinado período de tempo, sendo que a manutenção e reparação de eventuais danos provenientes de negligências de cálculo poderão ter sérias consequências a nível social e económico. A Fadiga, apesar de ser um fenómeno decorrente do funcionamento em serviço, constitui uma verificação de estado limite último pela natureza danosa e repercussões que pode originar na estrutura. As estruturas são, portanto, dimensionadas com o propósito último de cumprir as funções para as quais foram concebidas, mantendo todas as propriedades necessárias ao seu funcionamento por um tempo de vida pré-estabelecido. A este intervalo de tempo é atribuída a denominação de Vida Útil.

A cada tipo de estrutura estão associadas diferentes tipos de solicitação, seja em natureza, intensidade e frequência de atuação. No caso das pontes rodoviárias, a intensidade de solicitação das sobrecargas rodoviárias, em conjunto com a sua atuação cíclica, originam as condições ideais para a eventual ocorrência de propagação de fissuras de fadiga. O correto dimensionamento à Fadiga de pontes metálicas e mistas rodoviárias revela-se fundamental, uma vez que o desenvolvimento deste fenómeno compromete não só a sua Vida Útil, encurtando-a, como origina fortes impactos sociais e económicos no caso do eventual corte destas vias.

2.5.2. PORMENOR E CATEGORIA DE PORMENOR

O dimensionamento e construção de pontes metálicas e mistas implica, não só o estudo global e local em termos de secções resistentes, mas também o estudo de todas as ligações entre elementos principais e secundários. Um pormenor constitui uma descrição local pormenorizada de um determinado ponto da estrutura, contendo toda a informação em termos de dimensão e pormenores de execução. As curvas S-N ou de Wöhler permitem determinar o número de ciclos resistentes de um elemento, mediante a aplicação de uma tensão de amplitude constante. Uma forma de caracterizar um pormenor consiste na determinação da tensão de amplitude constante que provoca a rutura por Fadiga aos dois milhões de ciclos, sendo esta caracterização denominada por categoria de pormenor e adotada na norma EN1993-2 e EN1993-1-9. As normas de cálculo e dimensionamento apresentam sob a forma de tabelas, vários pormenores de ligação típicos organizados de acordo com a sua categoria de pormenor, englobando elementos contínuos, ligações mecânicas ou soldadas.

2.5.3. CONCEITO DE DANO

O conceito de dano por Fadiga pode ser entendido matematicamente, como a razão entre o número de ciclos de carga atuantes e o número de ciclos resistentes, obtido através da respetiva curva S-N, conhecido o intervalo de tensão de amplitude constante. Do ponto de vista físico, este conceito pode ser entendido como a parcela de vida útil “gasta” devido a um determinado carregamento cíclico.

2.5.4. OUTROS CONCEITOS

As definições apresentadas nesta secção, podem ser encontradas na EN1993-1-9 (1.3), pelo que apenas é efetuada a sua reprodução por conveniência à familiarização com os termos relativos à fadiga.

Tensão nominal – Tensão no material base ou numa soldadura adjacente à localização potencial de uma fenda, calculada pela teoria elástica excluindo qualquer efeito de concentração de tensões. Esta tensão pode ser uma tensão normal, uma tensão de corte, uma tensão principal ou uma tensão equivalente.

Caso de carregamento – Uma determinada sequência de carregamentos aplicados à estrutura, que dá origem a um historial de tensões, que se repete em geral um determinado número de vezes durante a vida da estrutura.

Historial de tensões – Registo ou cálculo da variação das tensões num determinado ponto da estrutura durante um caso de carregamento.

Intervalo de tensões – Diferença algébrica entre os dois extremos de um determinado ciclo de tensões que faz parte de um historial de tensões.

Espectro de variação das tensões – Histograma de todos os valores dos intervalos de tensões de diferentes amplitudes registados ou calculados para um determinado caso de carregamento.

Espectro de cálculo – Conjunto de todos os espectros de variação de tensões a considerar na avaliação da fadiga durante o tempo de vida de uma estrutura.

3.

3

METODOLOGIAS DE ANÁLISE À FADIGA

3.1 INTRODUÇÃO

No âmbito da verificação de segurança à fadiga, a resistência dos elementos estruturais pode ser avaliada mediante duas óticas. A primeira, a ótica do Método do Dano Acumulado, em que a resistência de determinado pormenor é avaliada de acordo com as curvas de resistência à fadiga (curvas S-N). A segunda, a ótica da Mecânica da Fratura, em que se procede ao estudo da propagação de uma fissura de fadiga, desde que esta se forma, até atingir um comprimento crítico (Ribeiro, 2004).

No âmbito da prática de projeto, neste caso de pontes mistas rodoviárias, não é de todo usual recorrer a análises baseadas na segunda ótica, uma vez que se tornaria demasiado moroso e exigente, do ponto de vista teórico, dificultando a obtenção de resultados práticos e expeditos. Assim, a ótica do Método do dano acumulado é aquela a que se recorre, e aos métodos simplificados baseados neste. As metodologias simplificadas baseadas no Método do Dano Acumulado são o Método da Tensão Equivalente de Dano e o Método da tensão equivalente de fadiga.

O Método do Dano Acumulado, apesar de constituir um método rigoroso e aplicável a qualquer tipo de estrutura, a sua aplicação é na grande maioria das vezes substituído por métodos simplificados presentes nas normas, pelo facto de a sua aplicação a um número elevado número de pormenores se tornar morosa e pouco prática. Assim, a aplicação deste método é muitas vezes usada em estudos que pretendem avaliar a precisão de outras metodologias de análise, constituindo os resultados um “grupo de controlo” e base de calibração para os diferentes métodos simplificados.

No âmbito do estudo apresentado no Capítulo 5 e 6, foram usados o Método do Dano Acumulado e o método simplificado presente na EN1993-2, baseado no Método da Tensão Equivalente de Dano. Ao longo de todo o estudo o Método do Dano acumulado foi usado como referência e ferramenta de comparação entre os resultados obtidos através de ambas as metodologias.

Assim, no presente capítulo serão explicitadas as metodologias do Método do Dano Acumulado e o Método da Tensão Equivalente de Dano, por serem as metodologias base das apresentadas na norma europeia e também, pelas razões referidas no parágrafo anterior, aquelas às que se recorreu no âmbito da realização deste projeto.

3.2 MÉTODO DO DANO ACUMULADO

O Método do Dano Acumulado constitui uma das principais metodologias de análise à fadiga, em todo o tipo de estruturas cuja possibilidade de padecer deste fenómeno seja uma realidade. As principais vantagens deste método residem no facto de ser extremamente rigoroso, por se basear unicamente nas curvas de resistência à fadiga (curvas S-N), e não recorrer a conversões e fórmulas simplificadas. Além disso, o facto de poder ser aplicado a qualquer tipo de elemento independentemente das suas dimensões ou função constitui também um aspeto decisivo na altura de eleger a metodologia a usar.

O dano numa determinada componente estrutural, tal como já referido aquando da sua definição, pode ser entendido como a parcela de vida útil “gasta” devido à atuação cíclica de determinado carregamento. Assim o Método do dano acumulado, tal como o nome indica, visa o estudo do dano existente numa peça em análise e a previsão da vida residual da mesma.

No âmbito das pontes metálicas ou mistas rodoviárias, a aplicação deste método é realizada mediante o seguinte procedimento genérico:

- 1 - Obtenção dos diagramas de tensão resultantes da passagem do tráfego rodoviário na estrutura;
- 2 - Determinação do espectro de tensões, mediante o uso de um procedimento de contagem de ciclos adequado;
- 3 - Cálculo do número de ciclos resistentes, associado a cada oscilação tensional de amplitude constante, através das curvas de resistência à Fadiga (curvas S-N);
- 4 - Obtenção do dano total gerado através da regra de dano cumulativo de Palmgren-Miner;

1 - A passagem do tráfego rodoviário numa ponte, gera oscilações de tensões nas diferentes componentes que a constituem. A variação da tensão, em determinado ponto da estrutura, pode ser representada sob a forma de diagrama de tensão em função do tempo, é o chamado histórico de tensões. Este diagrama assume uma forma contínua, sendo posteriormente transformado, substituindo os seus máximos e mínimos locais por pontos, obtendo-se um gráfico formado por retas, por forma a ser tratado de seguida por um método de contagem de ciclos (Figura 3.1).

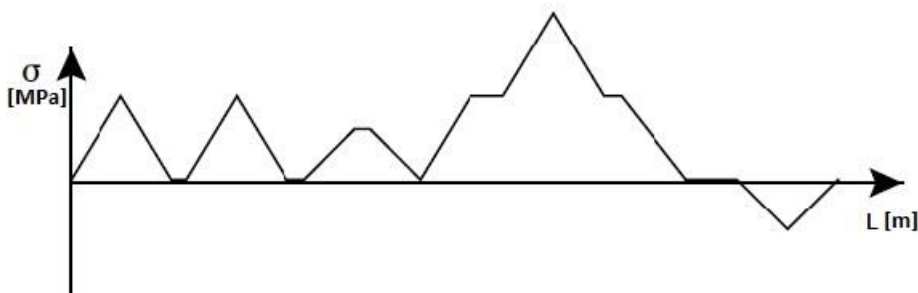


Figura 3.1 – Histórico de tensões (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

2 - Sendo conhecido o histórico de tensões, pode transformar-se, mediante o uso de um método de contagem adequado, o diagrama contínuo numa contagem de eventos discretos, definindo as várias classes de amplitude de tensão constante a que o elemento está sujeito. O resultado desta contagem, é um histograma constituído pelas diversas classes de amplitude de tensão constante, com os respetivos ciclos de solicitação correspondente a cada uma delas. Estes histogramas são apelidados de espectros de tensões, encontrando-se exemplificado na imagem da Figura 3.2 um histograma deste tipo.

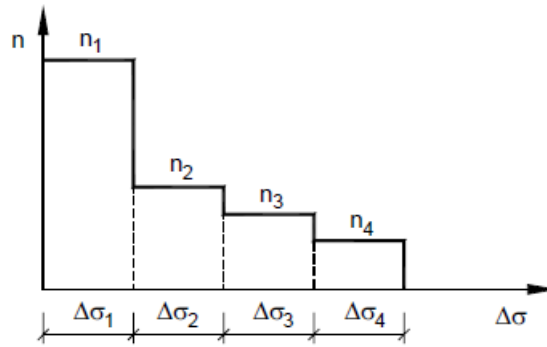


Figura 3.2 – Espectro de tensões (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

As diferentes oscilações de tensão, $\Delta\sigma_i$, correspondem à diferença entre o pico local máximo de tensão e o pico local mínimo de cada ciclo, obtendo-se assim a correspondente oscilação.

3 - Conhecidas as diferentes oscilações de tensão de amplitude constante, $\Delta\sigma_i$, recorre-se à definição de dano (expressão (3.1)) e procede-se ao cálculo do número de ciclos resistentes associado a cada oscilação tensional, mediante a curva S-N, cuja exposição teórica se encontra em 2.4, de determinado pormenor. Repetindo este cálculo para cada uma das oscilações, obtém-se a parcela de dano correspondente a cada oscilação tensional. Este procedimento encontra-se ilustrado na Figura 3.3.

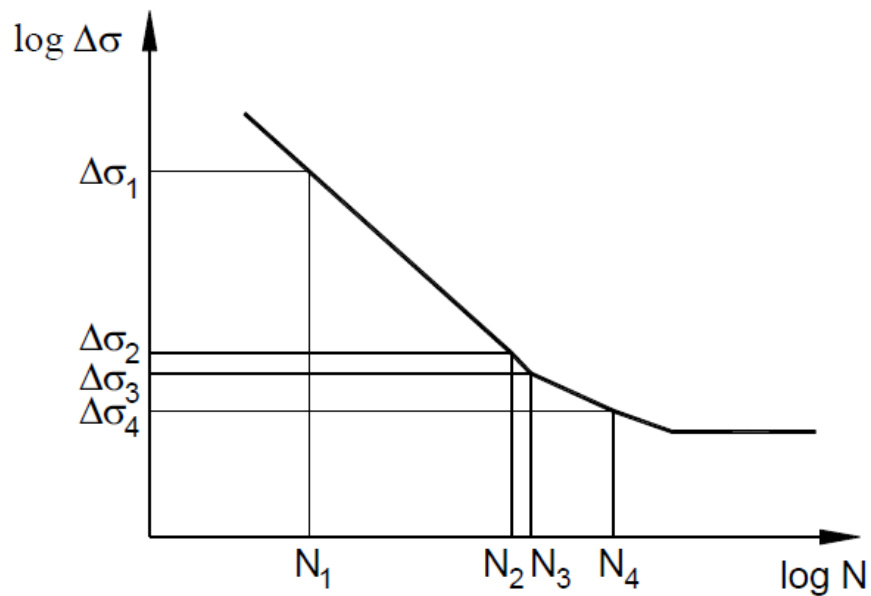


Figura 3.3 – Ciclos até à rutura (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

Assim, a parcela de dano gerado por cada oscilação, $\Delta\sigma_i$, é dada pela expressão,

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (3.1)$$

4 - Por fim, o cálculo do dano total provocado por cada parcela de oscilação tensional, é executado de acordo com um princípio de acumulação de dano. Das teorias de danos acumulados, aquela que tem maior divulgação na literatura e também a mais simples, é a regra linear proposta por Miner (Branco et al. 1999). A relação linear de acumulação de dano postulada por Miner é dada pela expressão,

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (3.2)$$

O critério de dimensionamento e verificação de segurança quando se recorre à regra de Miner é o seguinte:

- Se $D > 1$, ocorrerá rotura por fadiga durante a vida útil do componente, sendo necessário tomar medidas corretivas;
- Se $D=1$, a rotura por fadiga ocorrerá precisamente no final da vida útil estimada para o componente;
- Se $D < 1$, o componente apresenta características adequadas não ocorrendo rotura por fadiga durante o período de vida útil, podendo o valor residual da mesma ser estimado através da relação (3.3) ou (3.4) (Branco et al. 1999).

$$VR = \frac{\sum n_i}{\sum n_i / N_i} - \sum n_i \quad (3.3)$$

ou

$$VR = \sum n_i \times \left(\frac{1-D}{D} \right) \quad (3.4)$$

Apesar da regra de dano cumulativo de Miner ser largamente utilizada, é importante referir algumas considerações e limitações referentes a esta metodologia (Branco et al. 1999),

- A regra de Miner assenta no princípio de que tensões abaixo da tensão limite de fadiga não produzem qualquer dano, sendo o número de ciclos resistentes equivalente a estas tensões infinito (este efeito é contornado na normativa adotando troços com diferentes declives, como já se viu em 2.4)
- A aplicação desta regra não tem em consideração a ordem com que as diversas oscilações tensionais são aplicadas.

3.2.1. MÉTODOS DE CONTAGEM DE CICLOS

3.2.1.1 Método da gota de água (“Rainflow method”)

Como referido anteriormente, a transformação do histórico de tensões em espectros de tensões, envolve o uso de um método de contagem de ciclos adequado.

A contagem de ciclos pode ser efetuada mediante um dos seguintes critérios (Branco et al., 1999),

- Contagem dos máximos e mínimos relativos;
- Número de gamas de tensão: a contagem do número de classes entre extremos relativos;
- Número de passagens através de um nível de tensão predeterminado.

Na presente secção apenas serão descritos os métodos da gota de água e do reservatório por serem largamente aceites e por conduzirem a melhores previsões que os demais.

O método da gota de água, ou “*Rainflow method*”, recebe o seu nome da analogia com a queda de uma gota de água ao longo de um telhado de pagode.

Por forma a visualizar mais facilmente o método, o registo σ - t , é colocado na vertical, substituindo o registo contínuo apenas pelos seus máximos e mínimos locais (picos e vales, respetivamente) tal como ilustra a imagem da Figura 3.4. Os vales encontram-se numerados com números ímpares e os picos com números pares.

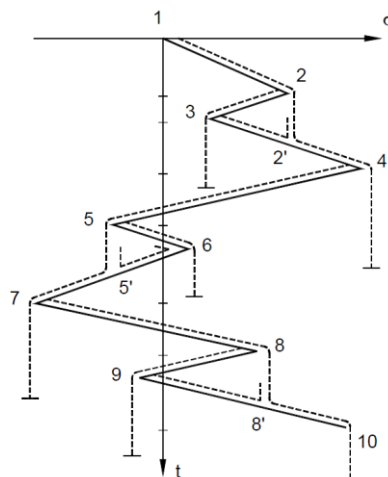


Figura 3.4 – Histórico de tensões rodado de 90° (Adaptado de Frýba (1996))

A contagem de ciclos através desta metodologia assenta nos seguintes princípios,

- Tomando como referência a Figura 3.4, a água pode cair tanto da direita para a esquerda como da esquerda para a direita iniciando-se sempre a partir de um pico ou vale.
- O percurso de uma gota de água é apenas interrompido se se cruzar com uma gota que precipita de um telhado superior, ou se precipitar de um pico ou vale mais positivo ou negativo do que aquele onde iniciou o seu percurso;
- Um novo percurso não é iniciado até o anterior estar concluído.

A título de exemplo dos critérios referidos,

- O trajeto 3-2' interseta a gota que precipita do telhado 2 assim como o trajeto 6-5' intersetam a gota que precipita de 5, pelo que os seus percursos são interrompidos.
- A gota que inicia o seu percurso no pico 2 e precipita no vale 3 termina o seu percurso pois o pico 4 é mais positivo que o pico 2, assim como a gota que inicia o seu percurso no vale 5 e precipita no pico 6 termina o seu percurso pois o vale 5 é menos negativo do que o vale 7.

Assim, cada percurso completo como os percursos 1-2-2'-4 e 7-8-8'-10, constituem meios ciclos e os percursos interrompidos como os percursos 5-6-5' e 2-3-2', constituem ciclos completos. Os meios ciclos e ciclos completos podem então ser contabilizados e representados como se pode observar na Figura 3.5.

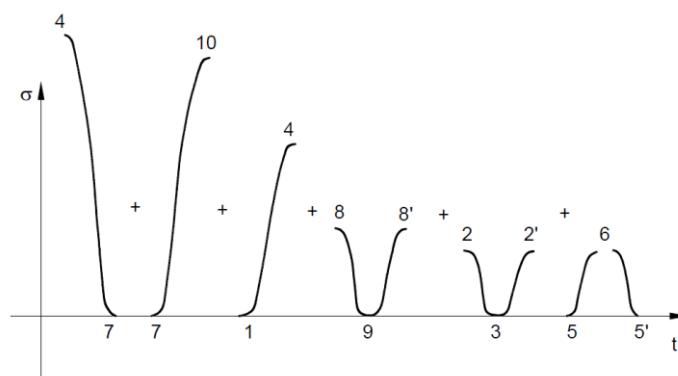


Figura 3.5 – Amplitudes de tensão reorganizadas depois da aplicação do Método da Gota de Água (Adaptado de Frýba (1996))

Esta metodologia pode ser facilmente implementada através de um algoritmo computacional, sendo referido por vários autores, por exemplo em Frýba (1996). No entanto, o algoritmo computacional inerente a esta metodologia de contagem não será aqui explicitada uma vez que não se incluiu no âmbito da realização deste estudo.

3.2.1.2 Método do reservatório (“Reservoir method”)

O método da gota de água é geralmente usado para contagem de ciclos em históricos de tensões de amplitude variável muito extensos, pelo facto de poder ser facilmente implementado computacionalmente. No entanto, existe um método gráfico, de visualização mais simples encontrando-se também largamente aceite, sendo este no entanto mais adequado para registos curtos. É o método do reservatório, ou em inglês “*Reservoir method*”, cujo nome deriva do facto de se assemelhar o registo de tensão a um reservatório de água imaginário, constituído por diversas “bolsas” de água, cujo processo de esvaziamento é efetuado através de drenos colocados nos seus pontos baixos.

Para levar a cabo a contagem de ciclos através desta metodologia, procede-se à duplicação de determinado evento de solicitação, unindo o último ponto do registo original ao primeiro ponto do registo duplicado obtendo-se um esquema como o da Figura 3.6.

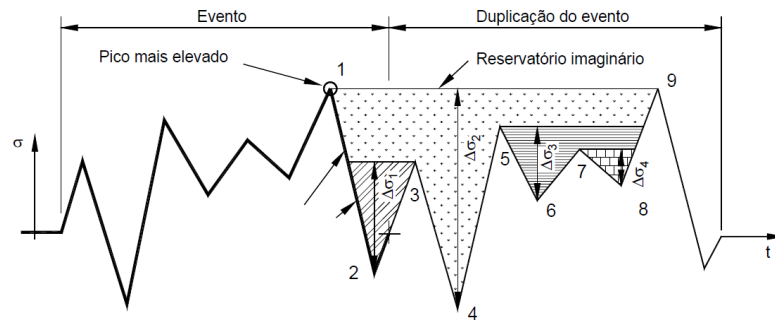


Figura 3.6 – Método do Reservatório (Adaptado de Ribeiro (2004))

Assim a contagem é efetuada de acordo com o seguinte procedimento,

- Um reservatório de água imaginário é definido mediante a união através de uma reta horizontal dos pontos de tensão mais elevados, ponto 1 e 9 da Figura 3.6.
- Procede-se ao esvaziamento do reservatório imaginário, principiando pelos pontos mais baixos, constituindo cada esvaziamento um ciclo. Por exemplo, o primeiro ciclo corresponde ao esvaziamento pelo ponto mais baixo, o ponto n.º 4, sendo a amplitude deste ciclo igual a, $\Delta\sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_4$.
- O esvaziamento a partir do ponto baixo n.º 4 não esgota por completo o reservatório imaginário, deixando ainda por esvaziar as “bolsas” mais pequenas representadas na Figura 3.6 por diferentes preenchimentos.
- A contagem prossegue, esvaziando sucessivamente os reservatórios mais pequenos através de pontos baixos cada vez mais elevados.
- Finalmente, a contagem termina quando o reservatório se encontra completamente vazio, no caso da Figura 3.6, quando a “bolsa” mais pequena é esvaziada através do ponto 8, sendo a amplitude deste ciclo dado por $\Delta\sigma_4$.

3.3 MÉTODO DA TENSÃO EQUIVALENTE DE DANO

O Método da tensão equivalente de dano é um método simplificado de análise à fadiga, baseado no Método do dano acumulado, residindo a sua principal vantagem no facto de simplificar consideravelmente o processo de verificação de segurança à fadiga, tornando-o mais fácil e expedito uma vez que não é necessário conhecer detalhadamente o histórico de solicitações a que estrutura esteve ou estará sujeita.

Esta metodologia é baseada na obtenção de uma tensão equivalente de dano, que representa a tensão que provocaria o mesmo dano originado pelo tráfego real na ponte ao longo de toda a sua vida útil.

Esta tensão equivalente resulta da calibração da oscilação tensional provocada numa única passagem por um veículo tipo devidamente calibrado para representar as ações de tráfego, mediante a sua correção através de coeficientes parciais de dano, que têm em conta as características da estrutura, a sua vida útil esperada bem como as características do tráfego a que está sujeita.

Assim a verificação de segurança através deste método assenta na comparação da tensão equivalente de dano com uma tensão de referência, correspondendo normalmente esta tensão de referência à tensão associada à categoria de pomenor.

O critério de segurança usado na aplicação deste método é dado pela expressão (3.5),

$$\Delta\sigma_E \leq \Delta\sigma_C \quad (3.5)$$

Em que,

- $\Delta\sigma_E$ - Corresponde à tensão máxima, resultante da passagem no modelo do veículo tipo, devidamente calibrada através de coeficientes parciais de dano na tensão equivalente de dano;
- $\Delta\sigma_C$ - Corresponde à categoria do pormenor em estudo, ou seja a resistência do pormenor aos 2 milhões de ciclos mediante a aplicação de um determinado intervalo de tensão de amplitude constante.

O método simplificado apresentado na norma EN1993 - 2, corresponde a uma metodologia baseada no método descrito acima, pelo que a sua descrição é apresentada em 4.4.

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS METODOLOGIAS DE ANÁLISE APRESENTADAS

Encontrando-se explicitados os métodos de análise à fadiga aos quais se recorreu no âmbito da realização deste projeto, mencionam-se algumas considerações relativamente ao método do dano acumulado tidas em conta aquando da sua aplicação nos Capítulos 5 e 6.

Assim, a aplicação do Método do Dano Acumulado foi aplicado mediante as seguintes considerações,

- Não se efetuaram quaisquer estudos de composição de tráfego, tendo-se optado pela utilização das diferentes intensidades de frequência de solicitação, assim como características de veículos-tipo, fornecidas na EN1991-2 (2003). Desta forma todo o estudo realizado se encontra englobado dentro da norma europeia, supondo a situação mais usual de não existência de dados deste teor.
- Tendo em conta o referido acima, os históricos de tensões obtidos, tanto na análise à fadiga global como local, constituem históricos de tensões correspondentes à passagem única de cada veículo-tipo nos modelos desenvolvidos, Figura 3.7. Assim, não se recorreu a nenhuma metodologia de contagem de ciclos, uma vez que estas apenas são necessárias quando existem registos de históricos de tensões de amplitude variável, resultantes de carregamentos aleatórios, sendo a sua forma de atuação representada pela Figura 3.8. Posto isto, a oscilação tensional provocada por cada veículo-tipo, foi obtida mediante a equação (3.6).

$$\Delta\sigma_i = \sigma_{MAX} - \sigma_{MIN} \quad (3.6)$$

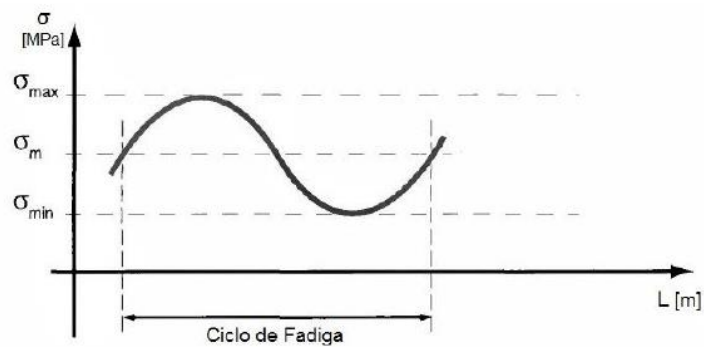


Figura 3.7 – Histórico de tensões de amplitude constante (Adaptado de Brozzetti et al. (1996))

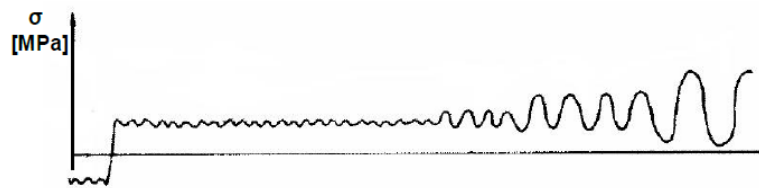


Figura 3.8 – Histórico de tensões de amplitude variável ordenado por blocos de amplitude constante (Adaptado de Branco et al. (1999))

- A cada oscilação tensional foi atribuída uma frequência de atuação ao longo da vida útil da estrutura, de acordo com as intensidades de tráfego sugeridas pela EN1991-2.

4.

4

ANÁLISE À FADIGA SEGUNDO A REGULAMENTAÇÃO EUROPEIA

4.1 INTRODUÇÃO

Inicialmente o fenómeno da fadiga era atribuído exclusivamente a pontes metálicas ferroviárias, devido às elevadas sobrecargas que as solicitavam. Atualmente o conjunto de estruturas que integram o grupo suscetível de sofrer deste fenómeno é muito mais alargado, sendo um destes elementos, as pontes mistas rodoviárias. O facto das distâncias percorridas serem cada vez maiores, leva a que o peso dos veículos pesados seja cada vez mais elevado, o que, em conjunto com as crescentes velocidades de circulação e frequência de passagem, gera um incremento de esforços muito significativo nestas estruturas.

Se outrora o fenómeno da fadiga era maioritariamente desprezado e considerado quase como um fenómeno de origem aleatória, hoje integra aquilo que constitui as bases de cálculo, dimensionamento e verificação de segurança de qualquer estrutura metálica ou mista.

Os primeiros códigos na Europa a abordar esta temática, foram a norma Alemã (DIN 15018, 1974), a norma Britânica (BS 5400-10, 1980) e a norma Americana AASHTO, sendo estas seguidas da primeira norma Europeia (ECCS, 1985) (Pravia, 2003). Com o aprofundamento do conhecimento e desenvolvimento de ferramentas adequadas ao seu tratamento, o fenómeno da fadiga é atualmente uma temática claramente abordada nos Eurocódigos, e que não dispensa um conjunto de verificações integradas e descritas nos mesmos. É neste sentido que surge exposição levada a cabo neste capítulo, procedendo-se à descrição das ferramentas definidas na família dos Eurocódigos estruturais, que visam a análise e a verificação de segurança no âmbito desta temática.

Os Eurocódigos em que são prescritas as verificações e critérios de análise à fadiga, e aos quais se recorreu no âmbito da realização do estudo levado a cabo neste projeto são,

- EN1991-2 (2003);
- EN1993-2 (2006);
- EN1993-1-9 (2010).

A norma EN1991-2 fornece informação acerca das ações a considerar, estipulando vários modelos de carga tendo em vista a análise à fadiga. As normas EN1993-1-9 e EN1993-2, enquadradas no âmbito das estruturas metálicas, em particular pontes metálicas/mistas, definem o método simplificado de análise à fadiga, assim como os respetivos fatores parciais e abordagem de cálculo.

4.2 CATEGORIA DE TRÁFEGO E MODELOS DE CARGA DE FADIGA SEGUNDO A EN1991-2

O tráfego pesado circulante numa ponte, gera oscilações tensionais nos diferentes elementos que a constituem, dependendo a intensidade destas oscilações de fatores como a geometria dos veículos, a sua distribuição de peso, espaçamento entre eixos, assim como volume e composição do tráfego atuante. Por forma a reproduzir os efeitos do tráfego, a EN1991-2 (2003) sugere o uso de diferentes modelos de carga, dependendo do método de análise usado, para levar a cabo as verificações de segurança à fadiga necessárias. Estes modelos de cargas constituem os chamados “*Fatigue Load Models*”. Esta secção é baseada diretamente na norma, EN1991-2 (2003), pelo que se procurou reproduzir os critérios presentes na mesma, por forma a facilitar a consulta destes no documento.

São 5 os “*Fatigue Load Models*” propostos pela EN 1991-2 (2003), pelo que o campo de aplicação de cada um se encontra definido abaixo,

- Os modelos FLM 1, 2 e 3 devem ser usados com o propósito de obter a tensão máxima e mínima, gerada nos elementos, resultante do seu respetivo posicionamento no tabuleiro por forma a conseguir este efeito.
- Os modelos FLM 4 e 5 têm por finalidade obter os espectros (distribuição de amplitude e frequência) das diferentes oscilações tensionais resultantes da sua passagem.
- Os modelos FLM 1 e 2 devem ser usados para determinar se a vida à fadiga de determinada estrutura pode ou não ser considerada infinita quando é fornecido um limite de amplitude de oscilação tensional. O modelo FLM1 constitui um modelo mais conservativo, e está pensado para cobrir automaticamente efeitos de circulação simultânea de pesados em diferentes vias. O modelo FLM2 é mais preciso que o primeiro, quando a presença de vários veículos pesados em diferentes vias de circulação pode ser desprezada para efeitos de verificação de segurança à fadiga.
- Os modelos FLM 3, 4 e 5 são adequados para efetuar análises à vida útil de fadiga através do uso das curvas de resistência (curvas S-N). Pelo fato de não cumprirem o mesmo propósito dos modelos FLM1 e 2, estes modelos não são numericamente comparáveis. O modelo FLM3 é ainda recomendado para usar em conjunto com métodos simplificados, nos quais é tido em conta o volume anual de tráfego de pesados, assim como as dimensões da ponte. Posto isto, conclui-se que os modelos FLM 4 e 5 devem ser usados quando se recorre ao Método do Dano Acumulado.
- O modelo FLM 4 é mais preciso do que o modelo FLM 3 numa variedade de pontes e tráfego, quando se pode desprezar a presença de vários veículos pesados na ponte. Se este não for o caso, deve ser usado apenas em conjunto com dados adicionais especificados no Anexo Nacional.
- O modelo FLM 5 é o modelo mais flexível podendo ser ajustado a dados de tráfego reais.

Em termos de categoria de tráfego, para efeito de análise à fadiga, a norma define valores para o volume de tráfego anual de pesados, em função do número de vias lentas por sentido de circulação que se reproduz na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Categorias de tráfego em função da tipologia de estrada (Adaptado de EN1991-2 (2003))

Categoria de tráfego		N_{obs} por ano e por via lenta
1	Estradas e vias rápidas com 2 ou mais vias por sentido com elevada taxa de circulação de pesados.	$2,0 \times 10^6$
2	Estradas e vias rápidas com taxa média de circulação de pesados	$0,5 \times 10^6$
3	Acessos principais com baixa taxa de circulação de pesados	$0,125 \times 10^6$
4	Acessos locais com baixa taxa de circulação de pesados	$0,05 \times 10^6$

Posto isto, proceder-se-á à descrição individualizada de cada um dos modelos de carga, explicitando as suas correspondentes características.

- “Fatigue Load Model 1”

O modelo FLM 1 apresenta a mesma configuração do modelo de sobrecarga rodoviária, *LM1*, explicitado na EN1991-2 (2003), modificando-se apenas o valor da carga distribuída e da carga concentrada associada aos “*Tandem Systems*”. O modelo de sobrecarga, *LM1*, assume a configuração representada pela imagem da Figura 4.1.

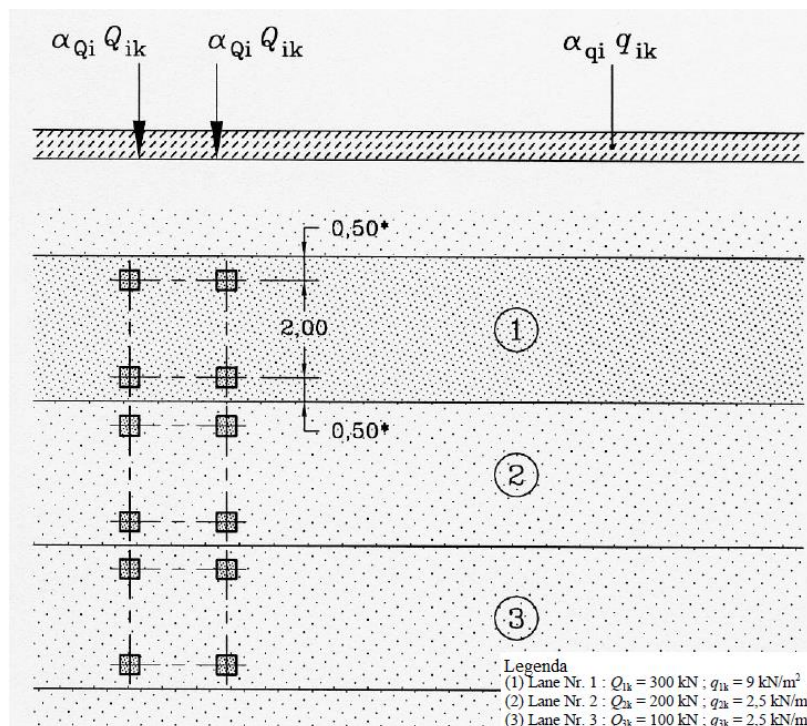


Figura 4.1 - Cargas do Load Model 1 (Adaptado de EN1991-2 (2003))

Como se pode observar na Figura 4.1, no caso do FLM 1 a carga distribuída aplicada nas diferentes *Notional Lanes*, assume o valor de $0,3q_{ik}$ e a carga concentrada dos *Tandem Systems* assume o valor de $0,7Q_{ik}$, exceto se forem sugeridos valores alternativos no anexo nacional.

- “Fatigue Load Model 2”

O modelo de carga FLM 2 consiste num conjunto de veículos pesados-tipo, apelidados de “veículos pesados frequentes”, e devem ser usados com o propósito de obter a máxima e mínima tensão devida à passagem individual de cada um dos veículos na via correspondente, posicionada de forma a obter o efeito mais severo no elemento pretendido. A Tabela 4.2 resume as características de cada um dos veículos,

Tabela 4.2 - Características dos veículos pesados do LM2 (Adaptado de EN1991-2 (2003))

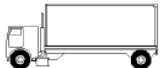

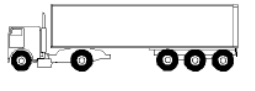
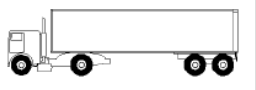

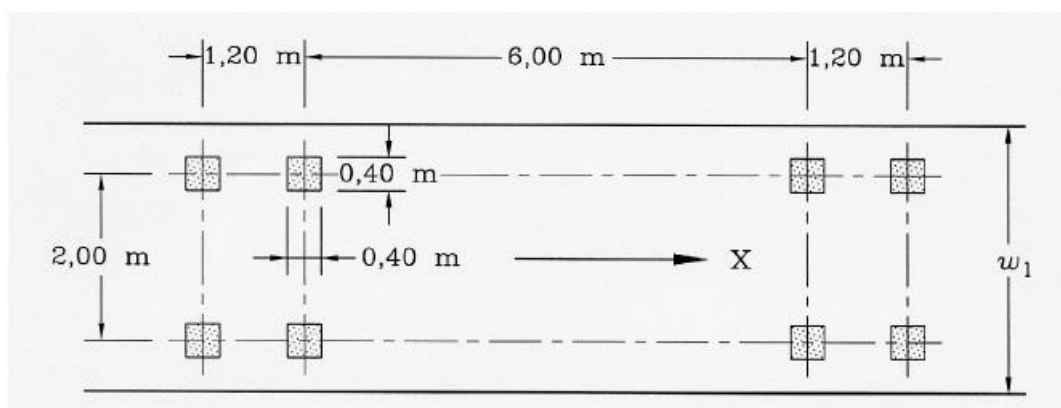
1		2	3	4
Perfil do veículo		Espaçamento entre eixos (m)	Carga equivalente por eixo (kN)	Tipo de roda
		4,5	90	A
			190	B
		4,20 1,30	80	A
			140	B
			140	B
		3,20 5,20 1,30 1,30 1,30	90	A
			180	B
			120	C
			120	C
			120	C
		3,40 6,00 1,80 1,80	90	A
			190	B
			140	B
			140	B
		4,80 3,60 4,40 1,30 1,30	90	A
			180	B
			120	C
			110	C
			110	C

Tabela 4.3 - Definição geométrica das dimensões das rodas em função do tipo de eixo (Adaptado de EN1991-2 (2003))

RODA/ EIXO TIPO	DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA
A	
B	
C	

- “Fatigue Load Model 3”

O modelo FLM 3 é constituído por 4 eixos, cada um deles com um par de rodas iguais. A geometria é, tal como se pode observar na Figura 4.2, definida por 4 eixos separados da seguinte sequência de distâncias, 1,2 m – 6 m – 1,2 m. O peso de cada eixo totaliza 120 kN (60 kN/roda), sendo a superfície de contacto de cada roda quadrada de lado 0,40 m.



LEGENDA:

W1: Largura da via

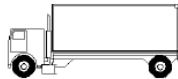

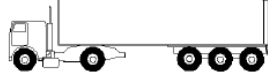
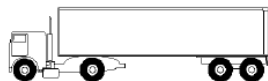
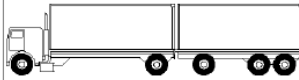
X : Eixo longitudinal do tabuleiro

Figura 4.2– Geometria do veículo de fadiga FLM3 (Adaptado de EN1991-2 (2003))

- “Fatigue Load Model 4”

O modelo de carga de fadiga FLM 4 engloba um conjunto de veículos pesados-tipo, cujo efeito conjunto é equivalente ao do tráfego característico das artérias rodoviárias europeias. A Tabela 4.4 detalha as características geométricas e de massa de cada um dos veículos tipo, definindo a percentagem de cada um no volume total de tráfego, N_{Obs} definido na Tabela 4.1, em função da distância do trajeto percorrido.

Tabela 4.4 - Características dos veículos pesados-tipo do modelo de fadiga FLM4 (Adaptado de EN1991-2 (2003))

TIPO DE VEÍCULO			TIPO DE TRÁFEGO			
1	2	3	4	5	6	7
			Longa distância	Média distância	Tráfego local	
Veículo pesado	Espaçamento entre eixo (m)	Carga equivalente por eixo (kN)	Percentagem de veículo	Percentagem de veículo	Percentagem de veículo	Tipo de roda
	4,5	70	20,0	40,0	80,0	A
		130				B
	4,20	70	5,0	10,0	5,0	A
	1,30	120				B
		120				B
	3,20	70	50,0	30,0	5,0	A
	5,20	150				B
	1,30	90				C
	1,30	90				C
	1,30	90				C
	3,40	70	15,0	15,0	5,0	A
	6,00	140				B
	1,80	90				B
		90				B
	4,80	70	10,0	5,0	5,0	A
	3,60	130				B
	4,40	90				C
	1,30	80				C
		80				C

- “Fatigue Load Model 5”

O modelo de carga FLM 5 consiste na aplicação direta de dados de tráfego reais, se necessário, extrapolados de acordo com métodos estatísticos apropriados. Para o uso deste modelo é recomendado averiguar os critérios definidos no respetivo Anexo Nacional.

4.3 FILOSOFIA DE DIMENSIONAMENTO – VIDA SEGURA V.S. DANO CONTROLADO

O dimensionamento de componentes estruturais à fadiga pode ser efetuado de acordo com duas abordagens distintas, conduzindo a alterações do procedimento de cálculo e de como a estrutura é pensada a longo prazo, mediante a escolha entre uma ou outra.

A primeira abordagem baseia-se no conceito de vida segura (“Safe-life” em inglês), cujo propósito último é determinar ou estimar a vida útil à fadiga de determinada componente. Isto é efetuado através de testes de resistência, determinando-se o período de vida útil de determinado elemento, tendo em conta um espectro de cargas cíclicas em serviço expectável para o mesmo. Assim, mediante o uso de um coeficiente de segurança aplicado à curva de resistência, a componente é dimensionada no sentido de não se verificarem danos significativos por fadiga, durante a vida útil desse elemento (Suresh, 1998) (Branco et al., 1999).

A segunda abordagem, de dano controlado (“Fail safe” em inglês), por outro lado, consiste em admitir que se desenvolva dano em determinados elementos, garantindo no entanto que a estrutura nunca colapsará devido à rutura desses elementos graças à sua capacidade de redistribuição. Assim, requisitos como a existência de dispositivos de paragem de fendas, materiais que conduzam ao desenvolvimento lento de fissuras, elementos críticos facilmente inspecionáveis, assim como redundância estrutural aliada a inspeções periódicas são alguns dos requisitos fundamentais para que se possa recorrer a esta abordagem de dimensionamento. (Suresh, 1998) (Branco et al., 1999)

Segundo a EN1993-1-9 (2010), o coeficiente parcial de segurança, γ_{Mf} , está dependente da abordagem de cálculo eleita, sendo o seu valor recomendado sugerido no quadro 3.1 dessa mesma secção. A Tabela 4.5 reproduz o quadro referido anteriormente, apresentando-se os valores sugeridos pela norma de acordo com a metodologia eleita.

Tabela 4.5 - Coeficiente parcial de segurança γ_{Mf} (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

<i>Método de verificação</i>	<i>Consequências da rotura</i>	
	<i>Consequências pouco importantes</i>	<i>Consequências importantes</i>
<i>Dano controlado</i>	<i>1,00</i>	<i>1,15</i>
<i>Tempo de vida garantido</i>	<i>1,15</i>	<i>1,35</i>

4.4 MÉTODO SIMPLIFICADO E ABORDAGEM DE CÁLCULO SEGUNDO A EN1993-2 E EN1993-1-9

Como referido anteriormente, a análise à fadiga segundo a norma europeia, neste caso a EN1993-2, pode ser levada a cabo através de um método simplificado. Este método é baseado no Método da Tensão Equivalente de Dano, explicitado em 3.3., e assenta na transformação da oscilação tensional de cálculo, obtida através do modelo de carga de fadiga FLM3, por forma a torná-la diretamente comparável com a categoria de pormenor em estudo.

Assim, para que se verifique a segurança à fadiga de um determinado pormenor de ligação, à luz do método simplificado, é necessário que se cumpra a seguinte condição (equação (4.1), (EN1993-2 – 9.5.1.(2))

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \quad (4.1)$$

Em que,

- γ_{Ff} - Fator parcial aplicado à ação de fadiga. De acordo com a EN1993-2 (9.3(1)), este fator deve assumir, salvo indicações contrárias no Anexo Nacional, o valor unitário.
- $\Delta\sigma_{E,2}$ - Oscilação tensional de cálculo equivalente, relativa a 2 milhões de ciclos.
- γ_{Mf} - Coeficiente parcial de resistência à fadiga. Este coeficiente depende da abordagem à fadiga (Tempo de vida garantida ou Dano controlado), sendo o seu valor dado de acordo com a tabela 3.1 da EN1993-1-9 (3), reproduzida na Tabela 4.5 deste documento.
- $\Delta\sigma_C$ - Categoria de pormenor para tensões normais, afetada das correções adequadas segundo as tabelas de referência 8.1 a 8.10 da EN1993-1-9 (Anexo B).

Por outro lado a tensão equivalente é dada pela equação (4.2),

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \phi_2 \cdot \Delta\sigma_p \quad (4.2)$$

Em que,

- $\Delta\sigma_{E,2}$ - Oscilação tensional normal de cálculo referida a 2 milhões de ciclos.
- λ - Coeficiente de dano que pretende converter a oscilação tensional de cálculo, causada pela carga tipo, $\Delta\sigma_p$, numa outra oscilação, de amplitude constante, que aplicada 2 milhões de ciclos induza o mesmo dano que o tráfego real ao longo da vida útil da estrutura.
- ϕ_2 - Fator de impacto de dano equivalente, este valor é unitário para pontes rodoviárias, segundo a EN1993-2 (9.4.1(5)).
- $\Delta\sigma_p$ - Intervalo de tensão normal de cálculo no elemento em estudo sob o efeito da carga de fadiga, $\gamma_{Ff}Q_k$, obtida através do modelo de carga de fadiga FLM3. De acordo com EN1993-2 (9.3(1)), o valor recomendado do coeficiente de ponderação γ_{Ff} , é igual a 1,00. $\Delta\sigma_p$ deve ser obtido através da expressão (4.3),

$$\Delta\sigma_p = |\sigma_{p,max} - \sigma_{p,min}| \quad (4.3)$$

Sendo o coeficiente λ dado pela equação (4.4),

$$\lambda = \min(\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4; \lambda_{max}) \quad (4.4)$$

Em que,

- λ_1 - Coeficiente de calibração da zona onde se encontra a secção de controlo, assim como o efeito do comprimento do vão.
- λ_2 - Coeficiente de ponderação da influência do peso médio dos veículos pesados circulantes, assim como, a respetiva frequência de passagem.
- λ_3 - Coeficiente de calibração que tem em conta o tempo de vida útil esperado para a estrutura.
- λ_4 - Coeficiente destinado a avaliar a influência de passagem de veículos pesados em mais do que uma via de circulação.
- λ_{max} - valor limitativo do coeficiente de dano, cujo valor está dependente do comprimento do vão e da zona onde se encontra a secção em estudo tal como λ_1 .

- Coeficiente λ_1

O coeficiente de dano parcial, λ_1 , pretende ter em conta o comprimento crítico da linha de influência da secção que se pretende estudar. A EN1993-2 (9.5.2(2)), sugere diferentes formas de obter tais comprimentos, dependendo do tipo de esforço, do elemento em estudo e da tipologia estrutural. O presente estudo apenas engloba o comportamento das estruturas por flexão, pelo que apenas se referem as considerações relativas a este tipo de esforço. Assim segundo a EN 1993-2 (9.5.2(2)),

- Para vãos simplesmente apoiados, o comprimento crítico, L_i , corresponde ao comprimento do vão.
- Para vãos contínuos tendo em vista a secção de centro de vão, o comprimento crítico, L_i , toma o valor do vão em que se enquadra a secção.
- Para vãos contínuos tendo em vista secções na zona de apoio, o comprimento crítico, L_i , é obtido através da média dos comprimentos dos vãos adjacentes à zona de apoio em estudo.

Conhecido o comprimento crítico da secção que se pretende analisar o coeficiente, λ_1 , é calculado através das fórmulas indicadas nas Figuras 4.3 e 4.4 para zonas de centro vão e zonas de apoio, respetivamente.

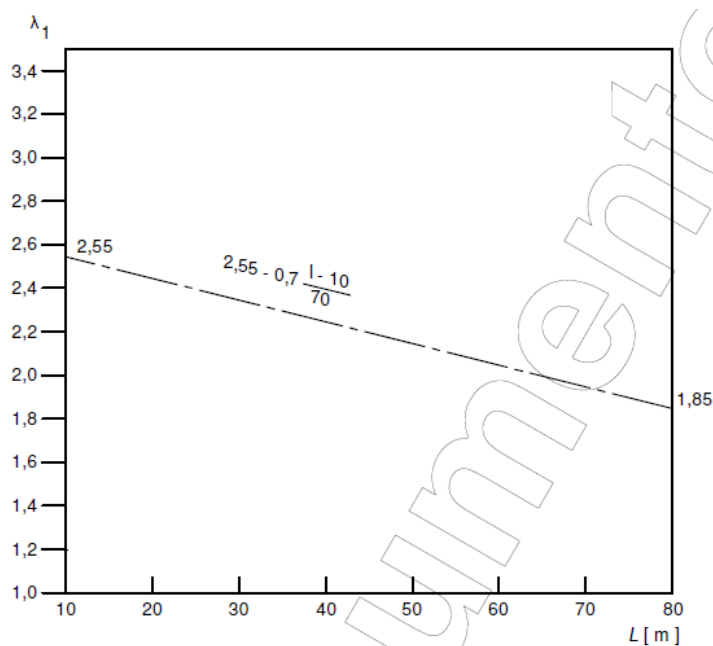


Figura 4.3 – Coeficiente λ_1 para zonas de centro de vão (Adaptado de EN1993-2 (2006))

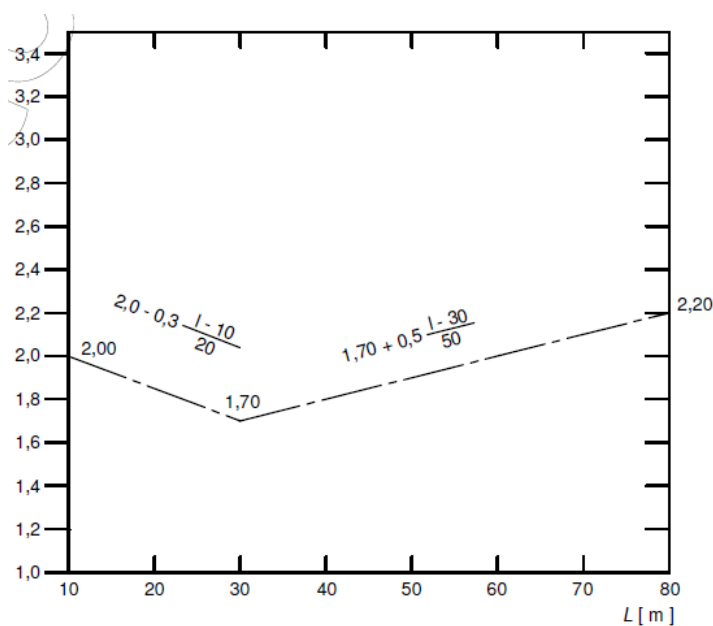


Figura 4.4 - Coeficiente λ_1 para zonas de apoio (Adaptado de EN1993-2 (2006))

- Coeficiente λ_2

Este coeficiente de calibração pretende avaliar o dano causado pelos veículos pesados que realmente circulam na ponte relativamente ao dano provocado pelo tráfego pesado tipo, constituído por um veículo pesado de 480 kN, considerando que este solicita 500 000 vezes a estrutura num ano. O tráfego pesado tipo foi determinado tendo em conta diversos estudos de tráfego englobando várias estradas Europeias (Croce, 2001).

Segundo a EN 1993-2 (9.5.2(3)), a expressão normativa para este coeficiente é a seguinte,

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \cdot \left(\frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{1/m} \quad (4.5)$$

Em que,

- Q_{m1} – peso médio do veículo pesado (kN), em termos de dano. O seu valor deve ser obtido de acordo com a expressão,

$$Q_{m1} = \left(\frac{\sum_i Q_i^m \cdot n_i}{\sum_i n_i} \right)^{1/m} \quad (4.6)$$

- Q_0 - peso do veículo pesado tipo, coincidente com o modelo FLM3, ou seja 480 kN.
- Q_i – peso, em kN, do veículo real i , circulante na via lenta.
- N_i – números de veículo pesados circulantes na via lenta.
- N_{obs} - intensidade média anual o tráfego pesado da via de circulação (pode ser medida, estimada ou alternativamente usando os valores da Tabela 4.1
- N_0 - intensidade média anual do tráfego tipo, $0,5 \cdot 10^6$ veículos/ano.
- m - expoente da curva de fadiga, $m=5$ para aço estrutural e $m=8$ para conetores de perno.

- Coeficiente λ_3

Segundo a EN1993-2 (9.5.2(5)), este coeficiente tem em conta os diferentes períodos de vida útil, relativamente ao período de vida útil base de 100 anos. Este coeficiente é dado pela expressão,

$$\lambda_3 = \left(\frac{t_{Ld}}{100} \right)^{1/5} \quad (4.7)$$

Em que t_{Ld} é a vida útil da estrutura em anos.

- Coeficiente λ_4

O coeficiente parcial, λ_4 , tem em conta a simultaneidade de veículos pesados circulantes em várias vias adicionalmente à via lenta de circulação e é dado, segundo EN 1993-2 (9.5.2(6)), pela expressão,

$$\lambda_4 = \left(1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot \left(\frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^m + \dots + \frac{N_k}{N_1} \cdot \left(\frac{\eta_k Q_{mk}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^m \right)^{1/m} \quad (4.8)$$

Em que,

- k – corresponde ao número de vias de circulação com tráfego pesado.
- N_j – é o número de veículos pesados por ano na via de circulação j .
- Q_{mj} – corresponde ao peso médio dos veículos pesados circulantes na via j .
- η_j – é o valor da linha de influência, para o esforço interno que produz a amplitude de tensão pretendida no centro da via de circulação j . Este valor deve ser introduzido na equação com sinal positivo.

- Coeficiente λ_{\max}

Este coeficiente representa o coeficiente de dano máximo que se consegue obter através desta metodologia. Os princípios de obtenção são semelhantes aos do coeficiente λ_1 , e pode ser calculado, no caso da flexão, mediante a expressão analítica presente nas Figuras 4.5 e 4.6, para zonas de centro de vão e de apoio, respetivamente. É importante referir que este coeficiente não existe no caso da verificação de segurança de conetores de pernos.

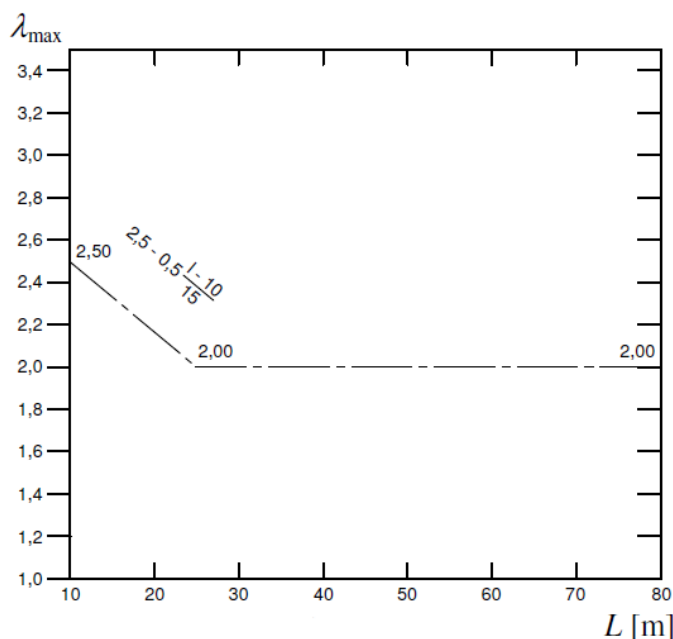


Figura 4.5 – Coeficiente λ_{\max} para zonas de centro de vão (Adaptado de EN1993-2 (2006))

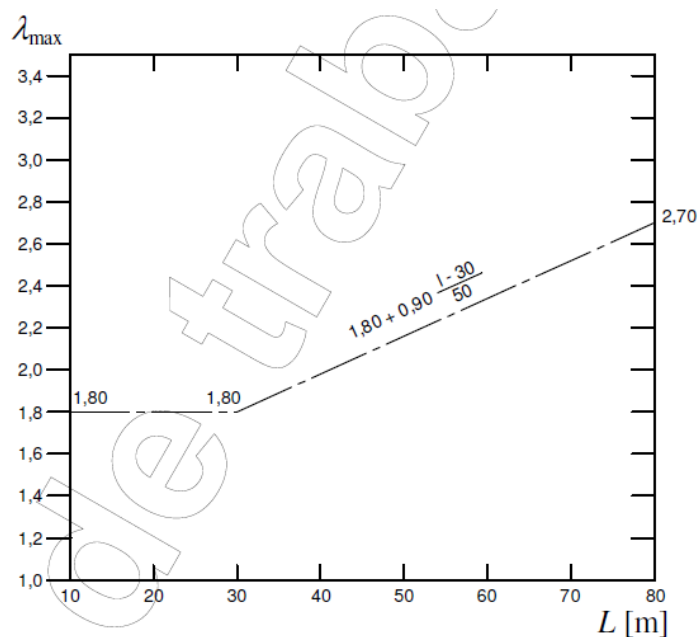


Figura 4.6 - Coeficiente λ_{\max} para zonas de apoio (Adaptado de EN1993-2 (2006))

4.5 CURVAS DE WÖHLER ADAPTADAS À REGULAMENTAÇÃO

Na presente secção serão explicitadas as curvas de resistência à fadiga, que constituem a relação analítica simplificada das curvas de Wöhler, presentes na EN1993-1-9 (2010) e EN1994-2 (2005). A exposição teórica relativa a estas curvas encontra-se em 2.4, pelo que apenas se procurou nesta secção, efetuar a descrição e caracterização das curvas de resistência adaptadas na norma por forma a facilitar a sua compreensão e aplicação.

Na Figura 4.7 encontra-se representada, em dupla escala logarítmica, a curva de resistência à fadiga para tensões normais de acordo com a EN1993-1-9 (7.1(3)).

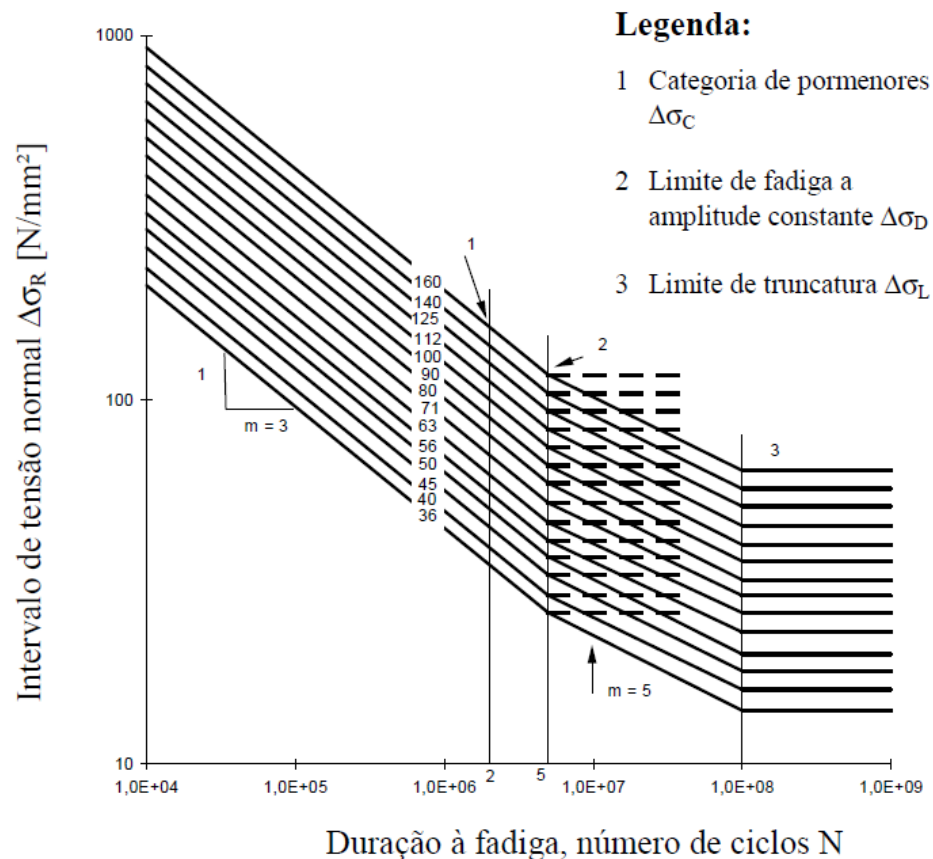


Figura 4.7 – Curvas de resistência para tensões normais em função da categoria de pormenor (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

Como se pode observar, a curva é constituída por 3 troços distintos,

- $m = 3$ – este troço da curva representa a zona de dano real, encontrando-se entre os 10 000 e os 5 000 000 de ciclos resistentes.
- $m = 5$ – corresponde ao troço de dano moderado, abaixo da tensão limite de fadiga a amplitude constante, correspondendo à zona de validade do método simplificado.
- $m = \infty$ – limite de truncatura. Supõe-se que amplitudes de tensão abaixo deste limite não provocam dano.

É importante referir que cada uma destas curvas se encontra associada a uma determinada categoria de pormenor, pelo que o ponto 1 corresponde a essa mesma categoria. Recordando o conceito, a categoria de pormenor representa tensão de amplitude constante que, quando aplicada 2 milhões de vezes a um determinado pormenor, leva à sua rutura.

No caso de elementos cujo funcionamento seja maioritariamente por corte, ou seja, em que as tensões tangenciais sejam relevantes, a curva de resistência apresenta ligeiras diferenças na sua configuração, tal como se pode observar na Figura 4.8.

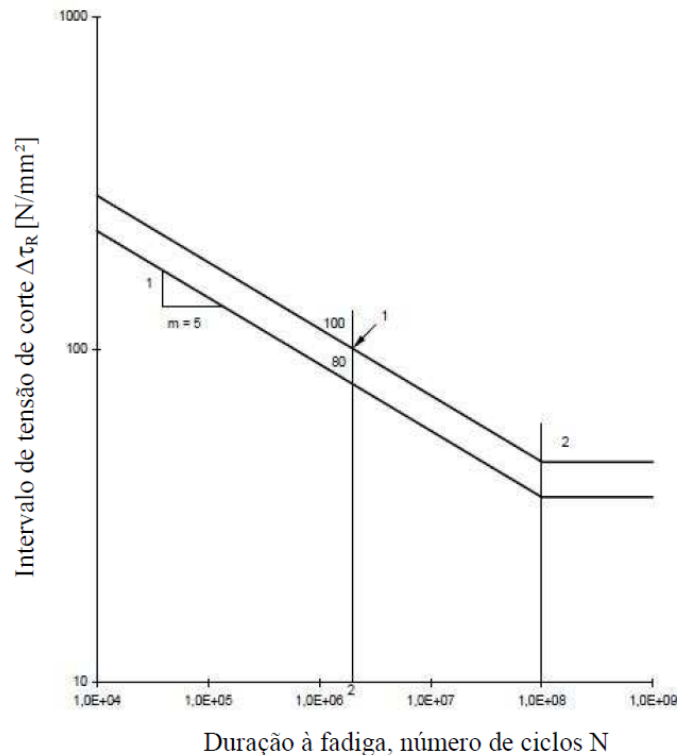


Figura 4.8 - Curvas de resistência para tensões tangenciais (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

A Figura 4.8 mostra que, a curva de resistência a tensões tangenciais é apenas caracterizada por dois troços, diferenciando-se da primeira curva pela não existência do troço de declive 1/3. Também neste caso o ponto 1 corresponde à categoria de pormenor.

No caso dos conectores de pernos, a curva de resistência presente na EN1994-2 (2005), é constituída apenas por um troço de declive 1/8, tal como se pode verificar na Figura 4.9,

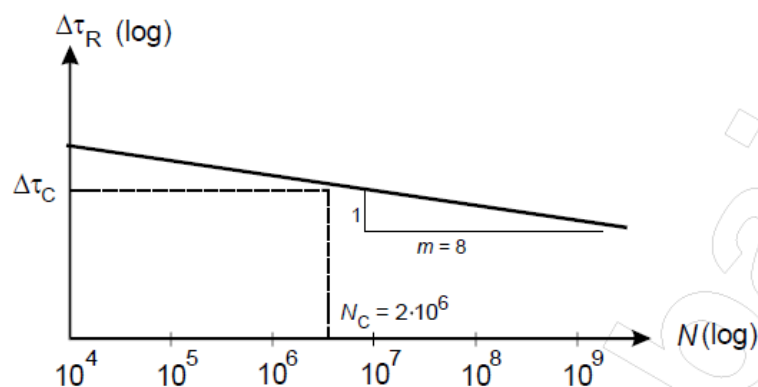


Figura 4.9 – Curva de resistência à fadiga para tensões tangenciais em conectores de pernos (Adaptado de EN1994-2 (2005))

4.6 CLASSIFICAÇÃO DE PORMENORES DE ACORDO COM A EN1993-1-9

A execução de estruturas metálicas exige não só o dimensionamento dos elementos que as suportam em função das cargas, mas também o planeamento dos pormenores de ligação que garantem o monolitismo entre os elementos estruturais, sejam eles soldados ou aparafusados, por forma a garantir o funcionamento conjunto e adequado da estrutura.

A EN993-1-9 fornece tabelas de classificação de pormenores, atribuindo em função do tipo de pormenor, a respetiva categoria tornando assim possível uma análise à fadiga através da curva de resistência desse mesmo pormenor. A Figura 4.10, ilustra um exemplo de um pormenor de um elemento contínuo, uma ligação soldada e uma ligação aparafusada,

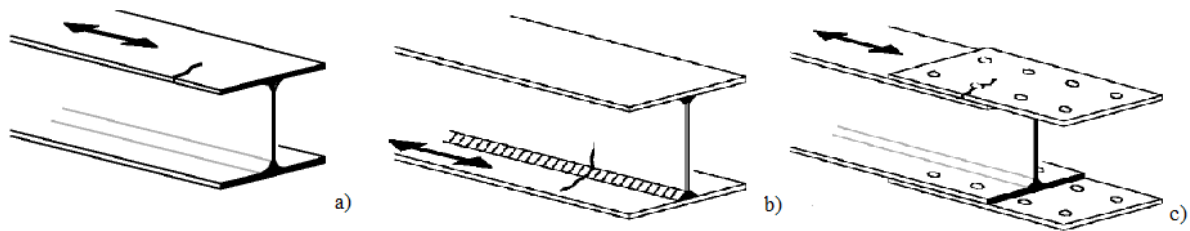


Figura 4.10 – Exemplo de um elemento contínuo a) de uma ligação soldada b) e uma ligação aparafusada c)
(Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

As tabelas de classificação de pormenores presentes na EN1993-1-9 (2010) encontram-se reproduzidas no Anexo B do presente documento.

5.

5

**ANÁLISE GLOBAL À FADIGA DE
PONTES MISTAS RODOVIÁRIAS****5.1 INTRODUÇÃO**

O estudo de fadiga elaborado neste projeto baseia-se em duas análises, a primeira ao nível de análise global longitudinal de pontes mistas rodoviárias, tratadas no presente capítulo, e a segunda ao nível da análise local das secções transversais tratada no capítulo seguinte.

Foram estudadas três pontes mistas rodoviárias no âmbito da análise global, estas encontram-se englobadas em duas das principais tipologias estruturais de pontes, em caixão e bi-viga, com diferentes vãos e diferente funcionamento estrutural, isostático ou hiperstático. Estas estruturas são suficientemente representativas de uma grande parte das pontes concebidas atualmente, razão pela qual se privilegiou o seu estudo.

Com a exposição levada a cabo no presente capítulo, pretende-se estudar não só o grau de sensibilidade à Fadiga, de acordo com o Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2 e do Dano Acumulado, das principais ligações das estruturas mencionadas, mas também avaliar o impacto da variação dos comprimentos dos principais vãos destas estruturas por forma a retirar conclusões acerca da aplicabilidade do Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2.

5.2 ESTRUTURAS ANALISADAS**5.2.1. PONTE TRES CANTOS**

Esta estrutura é uma ponte mista rodoviária isostática, com secção transversal em caixão constituída por um vão de 45,50 m (Figura 5.1) encontrando-se localizada na Província e Comunidade de Madrid, mais precisamente na localidade de Tres Cantos. Nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 encontra-se representada a estrutura em alçado e planta, bem como a secção transversal em zona de apoio e em centro de vão, respetivamente.

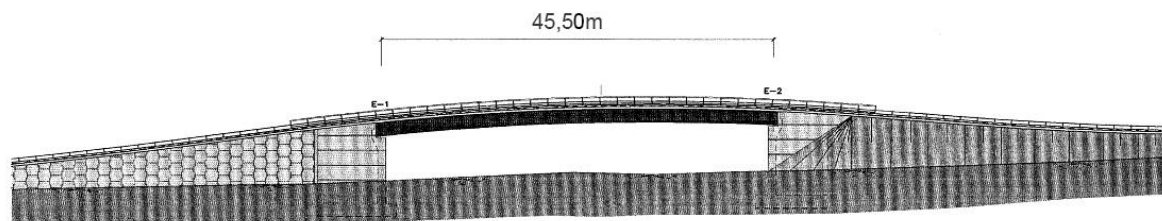


Figura 5.1 – Alçado da Ponte Tres Cantos

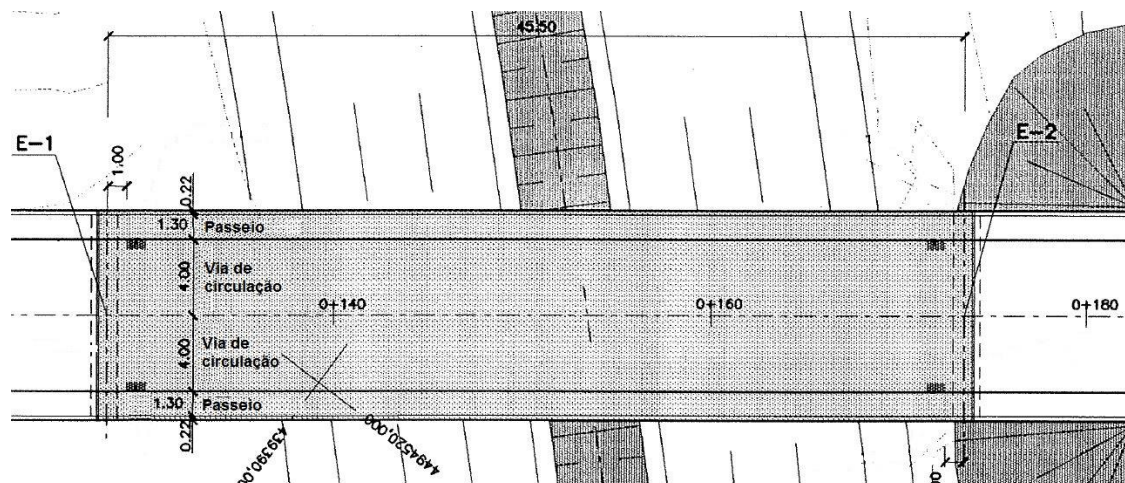


Figura 5.2 – Vista em planta da Ponte Tres Cantos

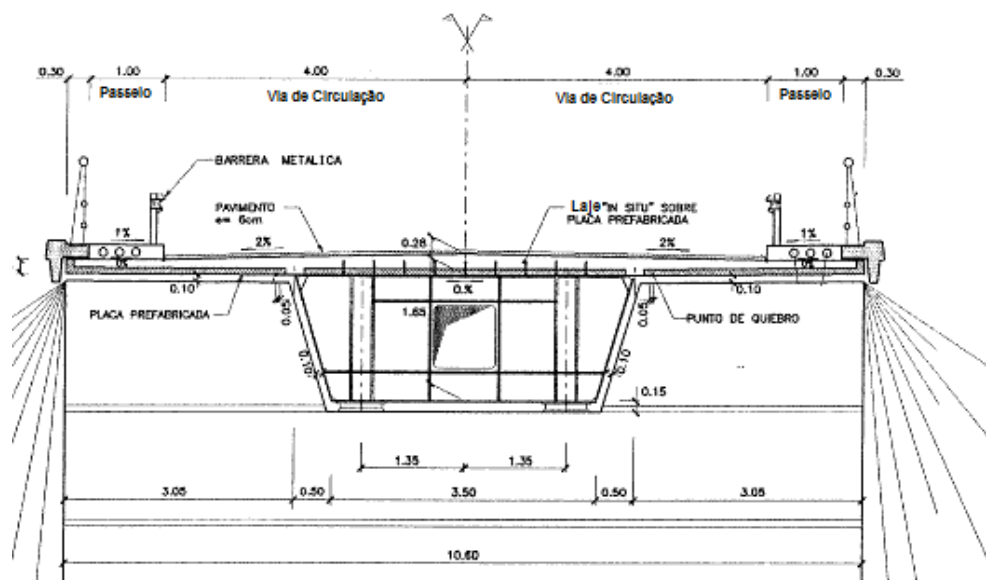


Figura 5.3 – Secção transversal em zona de apoio

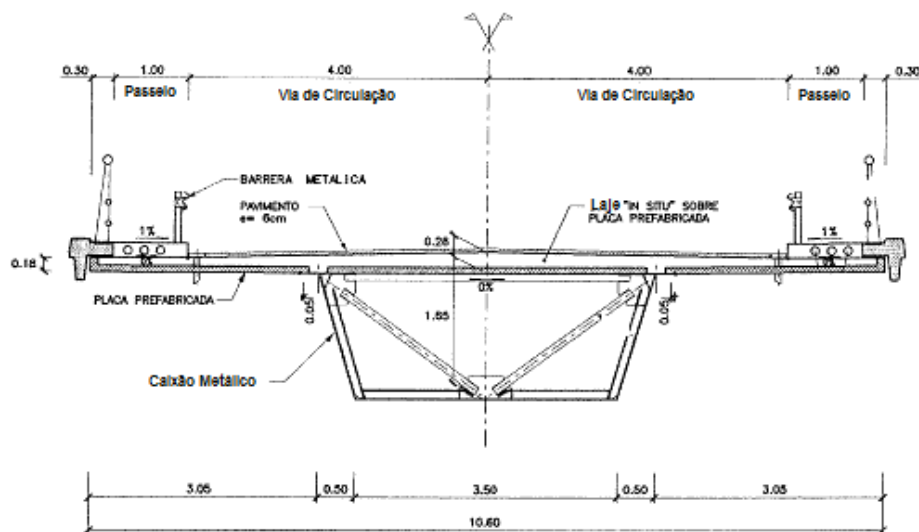


Figura 5.4 – Secção transversal em zona de centro de vão

Como se pode verificar na Figura 5.4, a secção transversal da ponte é constituída por um caixão metálico e uma laje de betão armado, materializando a última um tabuleiro com duas vias de circulação e totalizando uma largura de 10,60 m.

Os esforços na estrutura podem facilmente ser obtidos através de cálculo manual devido à sua simplicidade estrutural. No entanto, por forma a agilizar o processo, recorreu-se ao software de cálculo automático utilizado pela IDEAM S.A., *SofiStik*, a fim de se obter a variação dos esforços devido à passagem da sobrecarga rodoviária do veículo de fadiga. A Figura 5.5 apresenta o modelo desenvolvido.

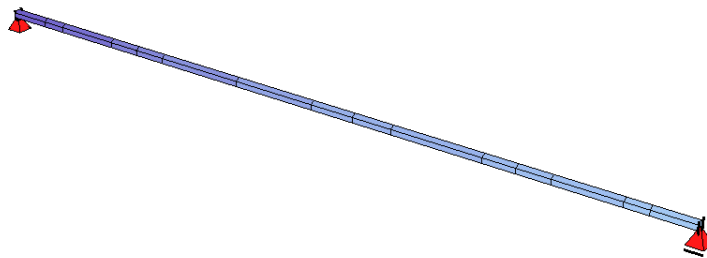


Figura 5.5 – Modelo da Ponte Tres Cantos em *SofiStik*

O modelo corresponde a uma barra simplesmente apoiada, com propriedades mecânicas unitárias, uma vez que estas não influem nos esforços da estrutura pelo facto de esta ser isostática.

Para efeito de modelação das ações correspondentes aos veículos de fadiga, procedeu-se à aplicação da resultante destas no eixo da secção, tal como se pode ver na Figura 5.6.

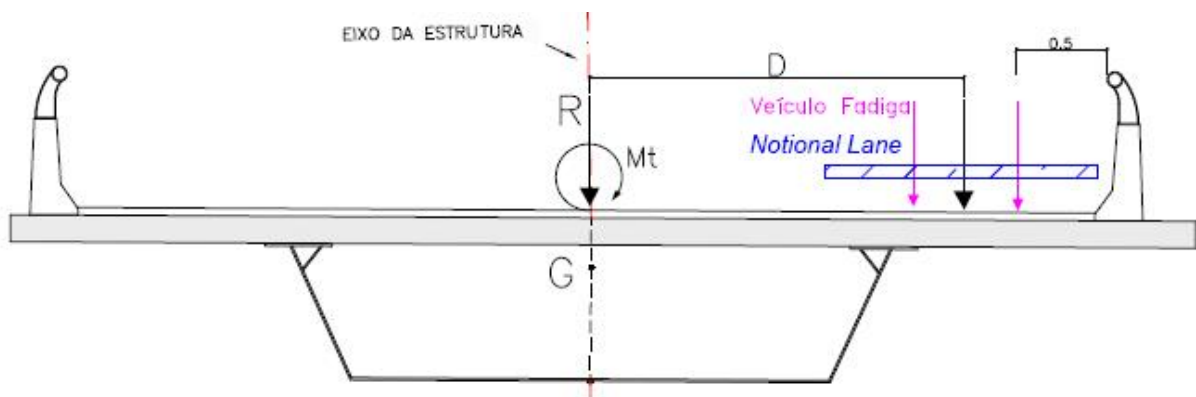


Figura 5.6 – Esquema de modelação das cargas excêntricas

As cargas são aplicadas no modelo, mediante a sua correspondente resultante sendo esta constituída por uma carga vertical e um momento torsor devido à excentricidade do veículo de fadiga. Esta excentricidade resulta da definição de *Notional Lane* presente na EN1991-2 (2003).

Na Figura 5.7, pode observar-se a modelação da passagem do veículo FLM3 na estrutura.

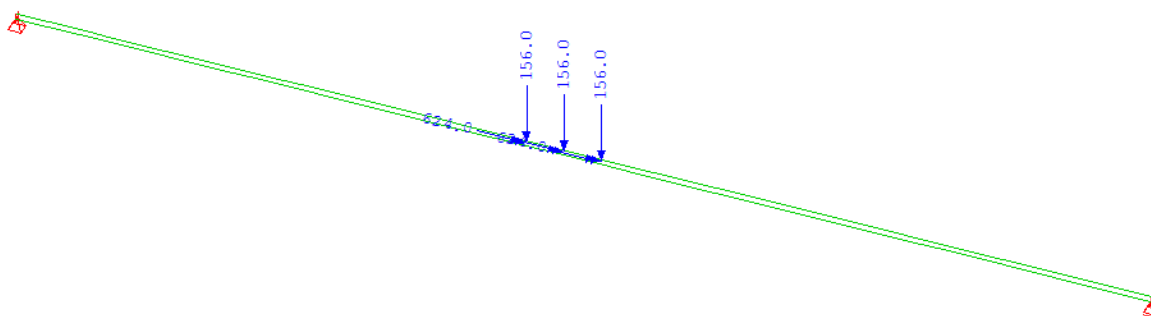


Figura 5.7 – Aplicação das cargas do modelo FLM3 no modelo numérico

5.2.2. PONTE FORNELLS

A ponte Fornells (Figura 5.8) é englobada na tipologia em caixão, tal como a estrutura anterior, sendo constituída por 3 vãos contínuos, funcionando hiperstaticamente. Os vãos extremos atingem um comprimento de 25 m, enquanto o vão central totaliza 45m de comprimento, resultando num comprimento total de 95 m tal como se pode ver na Figura 5.8.

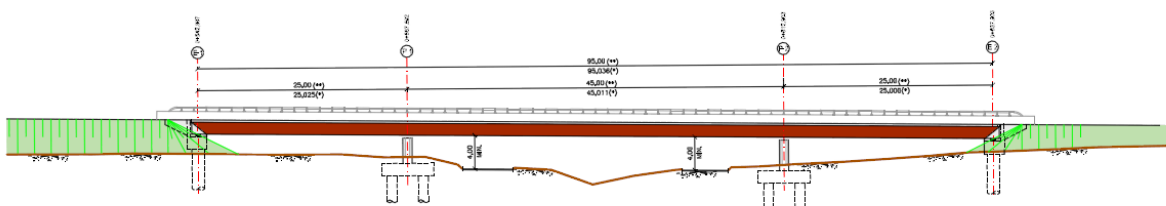


Figura 5.8 – Alçado da Ponte Fornells

Esta estrutura encontra-se localizada na AP7, autoestrada que percorre toda a costa mediterrânica, mais concretamente junto ao nó de Fornells. A estrutura em planta, assim como a secção transversal na zona de apoio, assim como a secção na zona de centro de vão, encontram-se representadas nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, respetivamente.

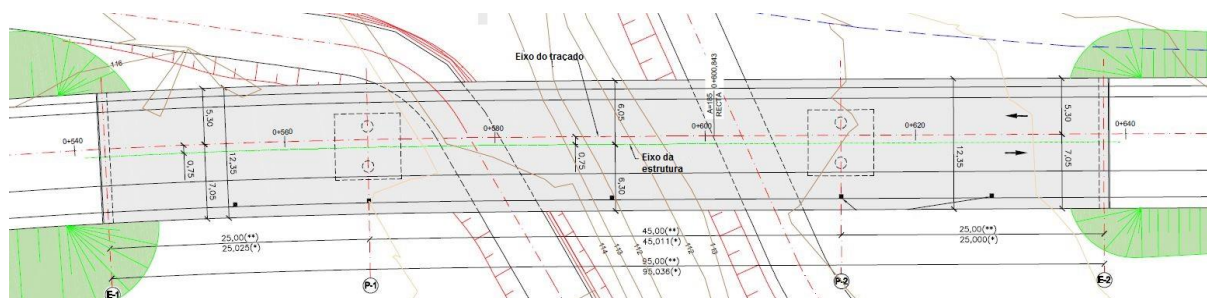


Figura 5.9 – Vista em planta da Ponte Fornells

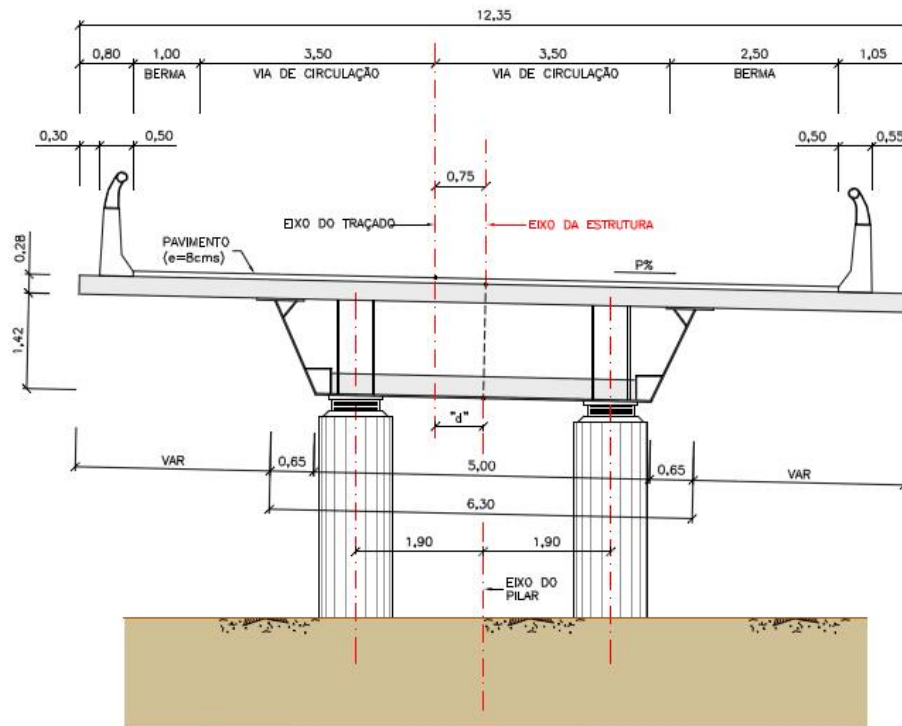


Figura 5.10 – Secção transversal da Ponte Fornells em zona de apoio

Note-se que, nas zonas de apoio, ou seja nas zonas de flexão predominantemente negativa, existe uma camada de betão de fundo. Este tipo de solução é muito comum em Espanha e tem como objetivo tirar partido da resistência à compressão do betão, por forma a poupar na espessura da chapa metálica de fundo. Este efeito é conhecido como efeito de dupla ação mista.

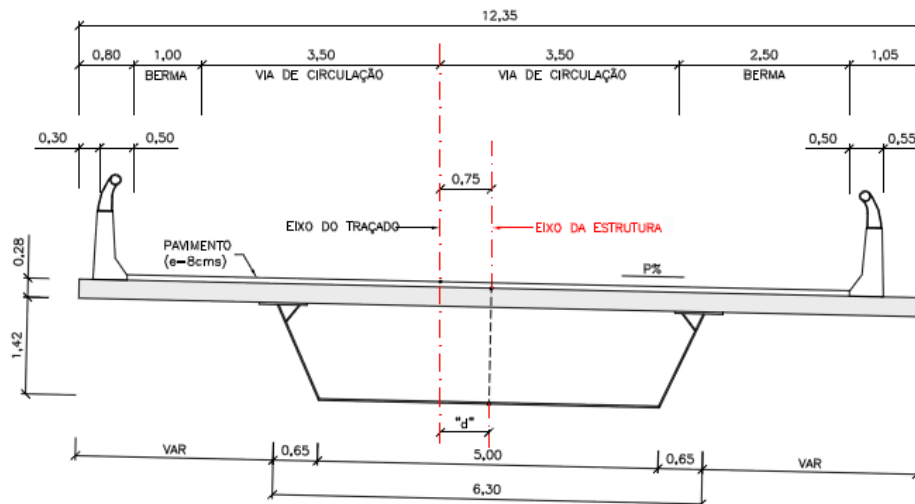


Figura 5.11 – Secção transversal da Ponte Fornells em zona de centro de vão

Na Figura 5.12 encontra-se representado o modelo desenvolvido em *SofiStik*, à semelhança do caso anterior.

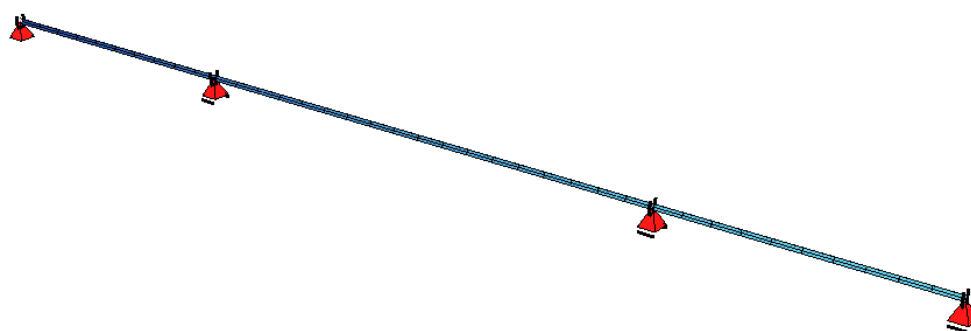


Figura 5.12 – Modelo em SofiStik da Ponte Fornells

Neste caso, as propriedades mecânicas das secções têm influência nos esforços, apesar destes serem suficientemente aproximados mesmo não tendo em conta esta variação de rigidez. Assim, as propriedades mecânicas foram definidas de acordo com as secções originais do projeto, atribuindo-se propriedades de secção fissurada na zona dos apoios, uma vez que esta é uma zona de flexão negativa, e propriedades correspondentes à secção bruta, nas secções de predomínio de flexão positiva.

Usualmente, a extensão da camada de betão de fundo correspondente à zona cujas propriedades mecânicas correspondem às de secção fissurada, e estende-se a cerca de 1/6 a 1/5 do comprimento do vão central para cada lado a partir do apoio. No caso da ponte Fornells, esta camada atinge os 10 m à esquerda e à direita do apoio.

Uma vez que se trata também de uma tipologia seccional em caixão, as cargas correspondentes ao veículo de fadiga foram modeladas usando o critério definido na secção anterior.

5.2.3. PONTE UTE – NUENO

A ponte Ute-Nueno (Figura 5.13 e 5.14), cuja designação foi atribuída, tal como nos casos expostos anteriormente, pela localização onde se encontra inserida, constitui uma estrutura pertencente à tipologia bi-viga. Esta ponte é materializada por duas vigas metálicas de perfis soldados funcionando em conjunto com uma laje de betão armado. No entanto, esta configuração altera-se nas imediações das zonas de apoio, através da transformação da secção bi-viga em caixão, recorrendo ao efeito de dupla ação mista (Laje de betão superior e inferior). A altura da secção é também variável atingindo a sua altura máxima na secção de apoio, com o propósito de conferir maior rigidez nesta zona.

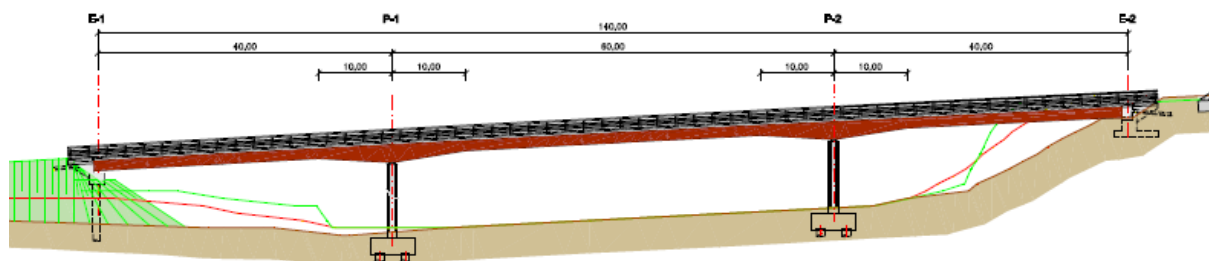


Figura 5.13 – Alçado da Ponte Ute - Nueno

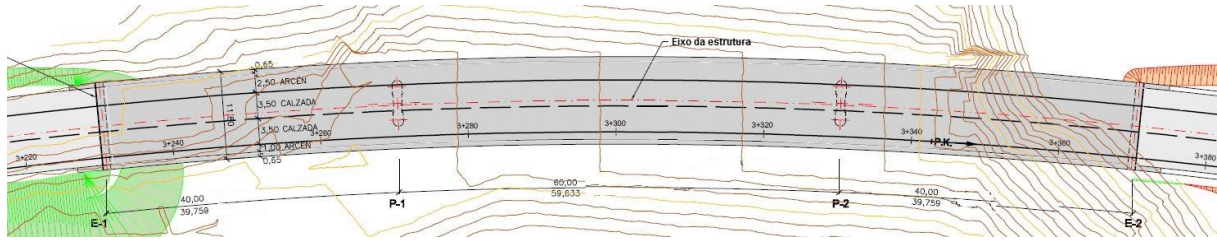


Figura 5.14 – Vista em planta da Ponte Nueno

A ponte é constituída por três vãos contínuos, atingindo os vãos extremos 40 m de comprimento e o vão central um comprimento de 60 m, totalizando 140 m tal como se observa na Figura 5.13. As secções transversais em zona de apoio e de centro de vão encontram-se representadas nas Figuras 5.15 e 5.16, respetivamente.

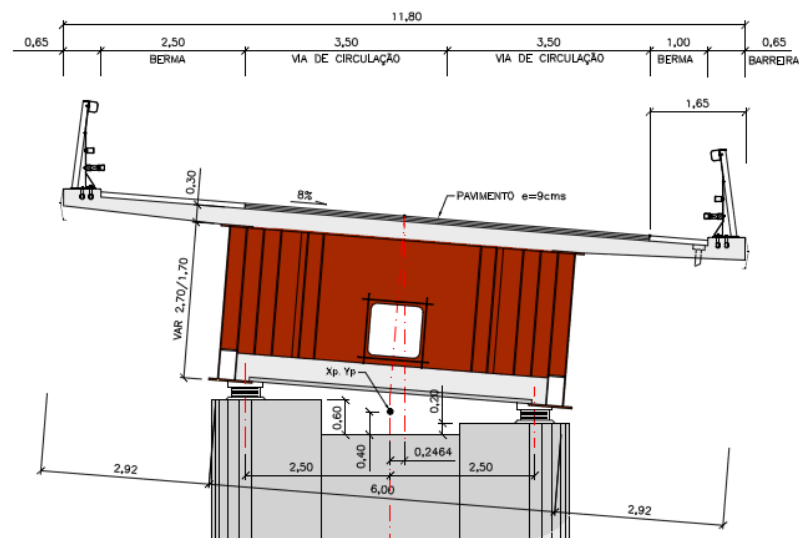


Figura 5.15 – Secção transversal da Ponte Ute – Nueno em zona de apoio

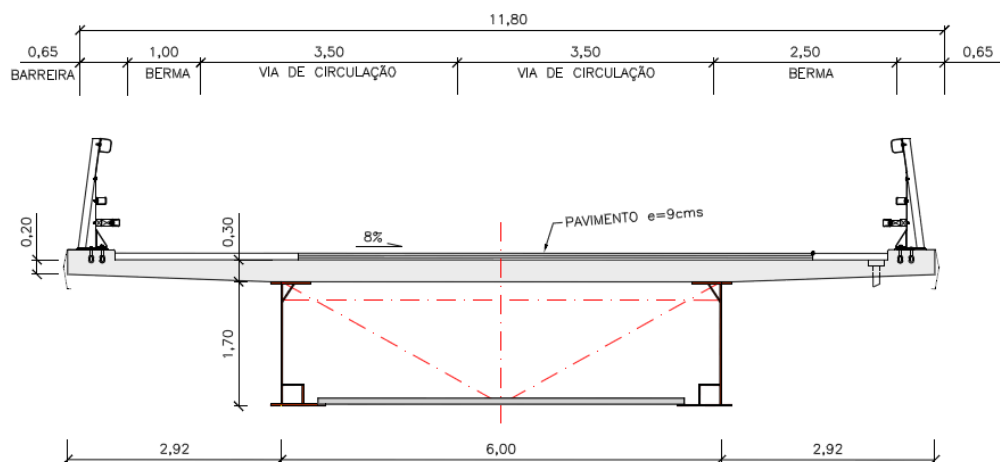


Figura 5.16 – Secção transversal da Ponte Ute – Nueno em zona de centro de vão

Novamente recorrendo ao software de cálculo automático, *SofiStik*, desenvolveu-se um modelo de barras tal como se pode observar na Figura 5.17. Por forma a simular o comportamento “isolado” de cada viga, atribuiu-se a cada uma das barras longitudinais as propriedades mecânicas de meia secção, simulando as barras transversais o funcionamento da laje de betão. Na zona de apoio, a secção modelada corresponde a uma barra com as propriedades mecânicas correspondentes às de uma secção em caixão fissurada.

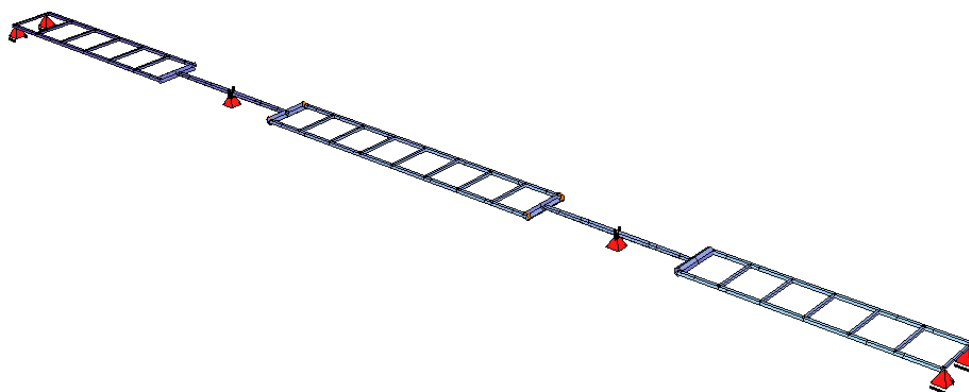


Figura 5.17 – Modelo em *SofiStik* da Ponte Ute - Nueno

Note-se que neste caso, o funcionamento estrutural da secção mediante a aplicação de cargas excêntricas é distinto dos casos anteriores, uma vez que a resposta ao momento torsor originado pela excentricidade das cargas na zona bi-viga é dada através da mobilização de um binário de reação nas vigas (Figura 5.18).

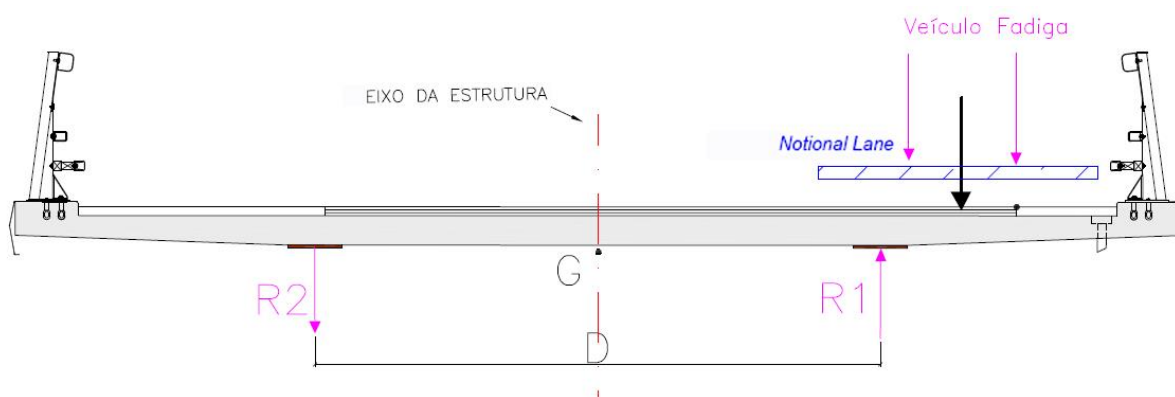


Figura 5.18 – Resposta da secção transversal mediante cargas excêntricas

As cargas introduzidas no modelo na zona bi-viga correspondem então às reações R1 e R2 (Figura 5.19) obtidas estaticamente através do esquema representado na Figura 5.18. Quanto à zona de secção em caixão, as cargas foram modeladas de acordo com o critério usado nas secções anteriores (Figura 5.20).

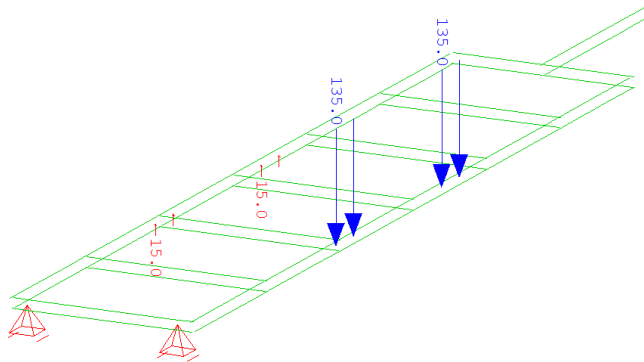


Figura 5.19 – Cargas aplicadas na zona bi-viga.

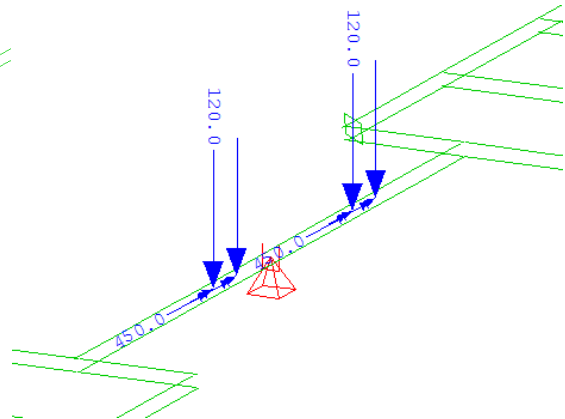


Figura 5.20 – Cargas aplicadas na zona em caixa

5.3 ELEMENTOS E LIGAÇÕES ANALISADAS

Nesta secção serão abordados todos os pontos críticos passíveis de serem analisados à fadiga. Note-se que por ponto crítico, entende-se qualquer ponto onde se produzam concentrações de tensões que podem levar à formação de fissuras por fadiga, constituindo os pontos onde se produzem ligações e alterações de secções, zonas que requerem um estudo mais detalhado.

Como se pode observar na Figura 5.21, todas as secções transversais são constituídas por elementos metálicos comuns, nomeadamente, almas, banzos superiores e inferiores, células superiores e inferiores. Estes elementos são materializados por chapas metálicas, unidas por ligações soldadas sempre que se verifique uma alteração da espessura das mesmas, ou simplesmente por motivos de facilidade de produção ou transporte.

Tal como já referido em 4.6, a EN1993-1-9, fornece tabelas de classificação de pormenores de ligação. No âmbito da análise global à fadiga, os pormenores passíveis de serem analisados são:

- 1 - Ligação longitudinal da alma ao banzo superior;
- 2 - Ligação longitudinal da célula superior ao banzo superior;
- 3 - Ligação longitudinal da célula superior à alma;
- 4 - Ligação longitudinal da célula inferior à alma;
- 5 - Ligação longitudinal da alma à chapa de fundo;
- 6 - Ligação longitudinal célula inferior à chapa de fundo;
- 7 - Ligação transversal do banzo inferior das vigas.
- 8 - Ligação transversal da chapa de fundo do caixão.
- Ligação transversal de alma;
- Ligação transversal de células superiores e inferiores;

As Figura 5.21 e 5.22 representam a localização destes pormenores nas secções em caixão e bi-viga.

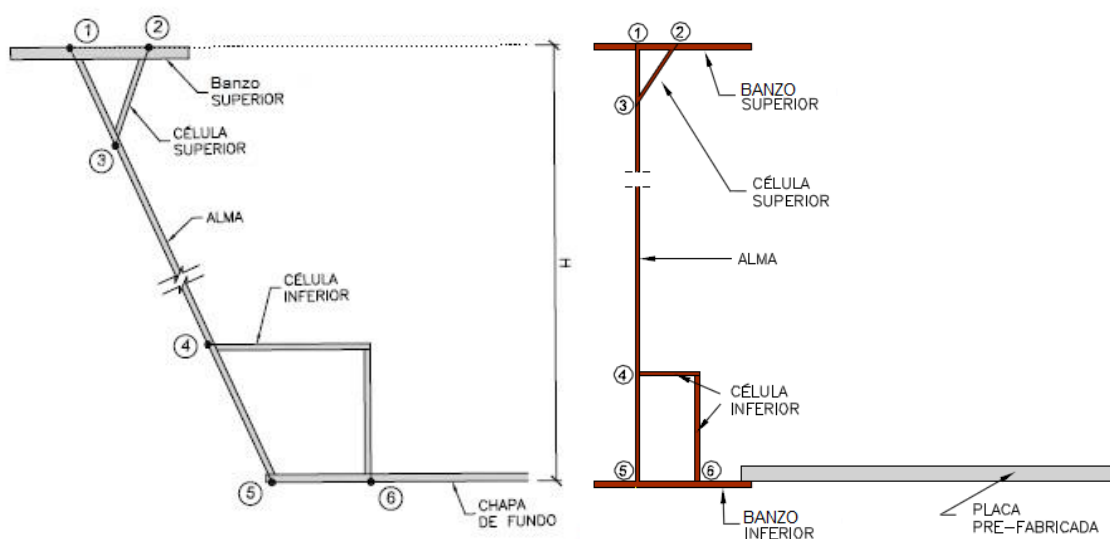


Figura 5.21 – Representação das ligações soldadas longitudinais nas secções transversais (caixão e bi-viga)

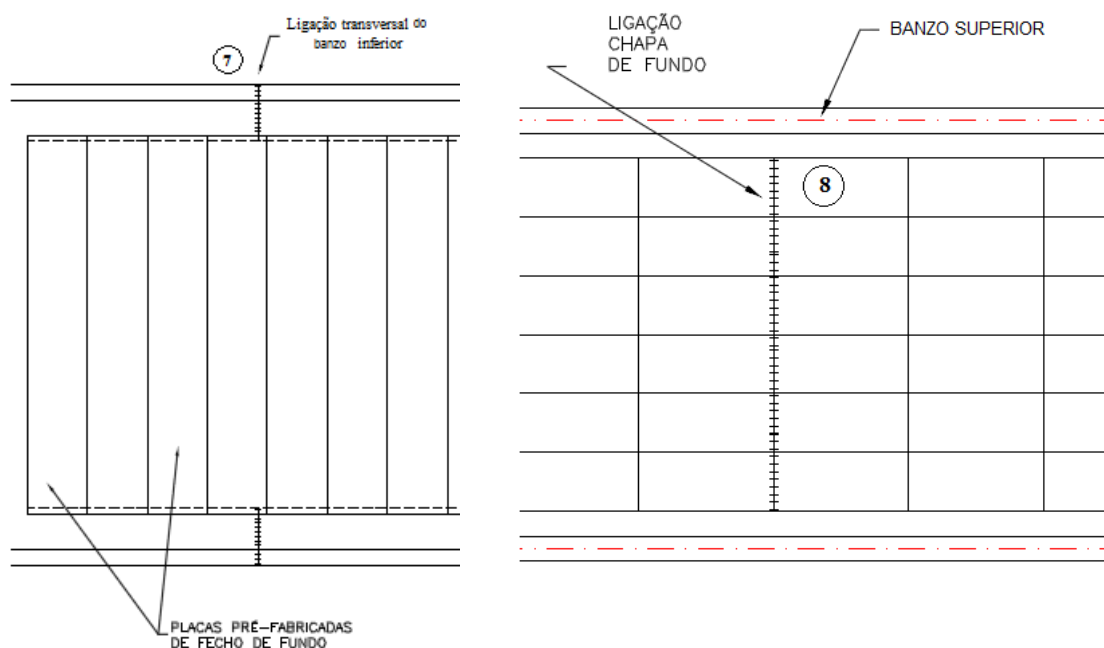


Figura 5.22 – Representação em planta das ligações transversais soldadas

Note-se que todos os elementos foram representados na mesma secção por forma a facilitar a sua visualização. No entanto, nem todos se mantêm presentes simultaneamente ao longo do comprimento do vão. É o caso, por exemplo, das células superiores e inferiores, que apenas existem em zonas de flexão positiva ou negativa, respetivamente.

As seis ligações longitudinais referidas constituem soldaduras a topo com penetração total ou parcial como se pode verificar nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25.

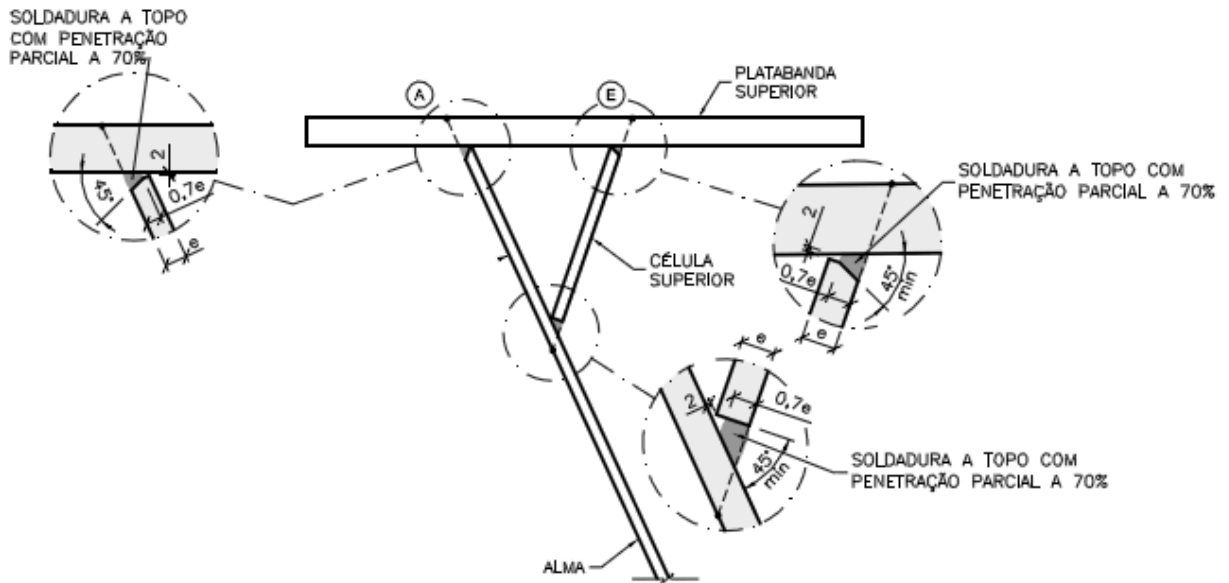


Figura 5.23 – Descrição do tipo de soldadura das ligações da alma do caixão e da célula superior à banzo superior (Adaptado de Freitas (2014))

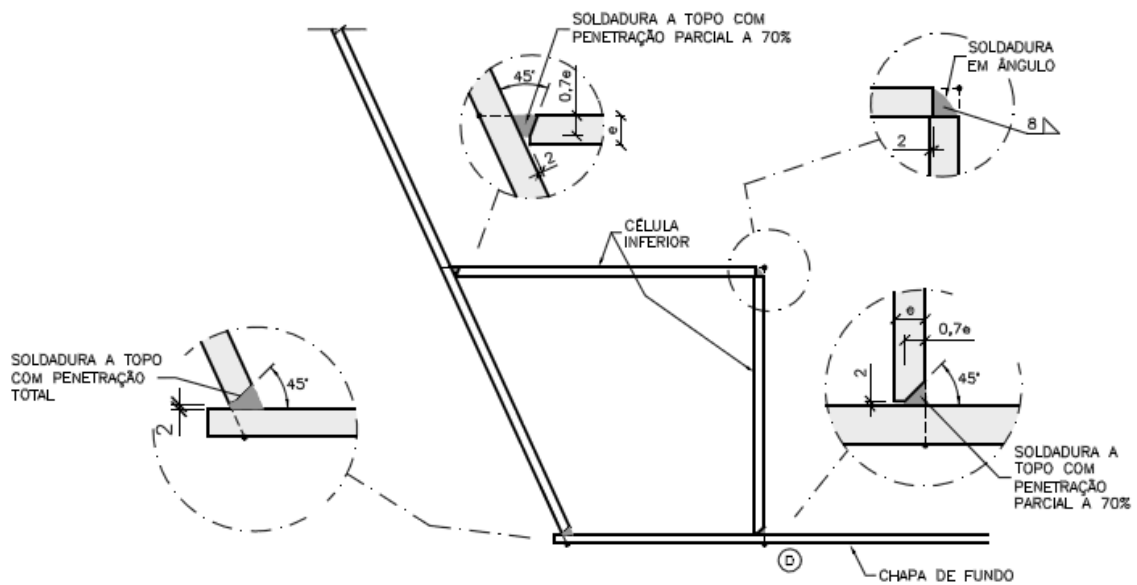


Figura 5.24 - Descrição do tipo de soldadura das ligações da célula inferior à alma e à chapa de fundo do caixão (Adaptado de Freitas (2014))

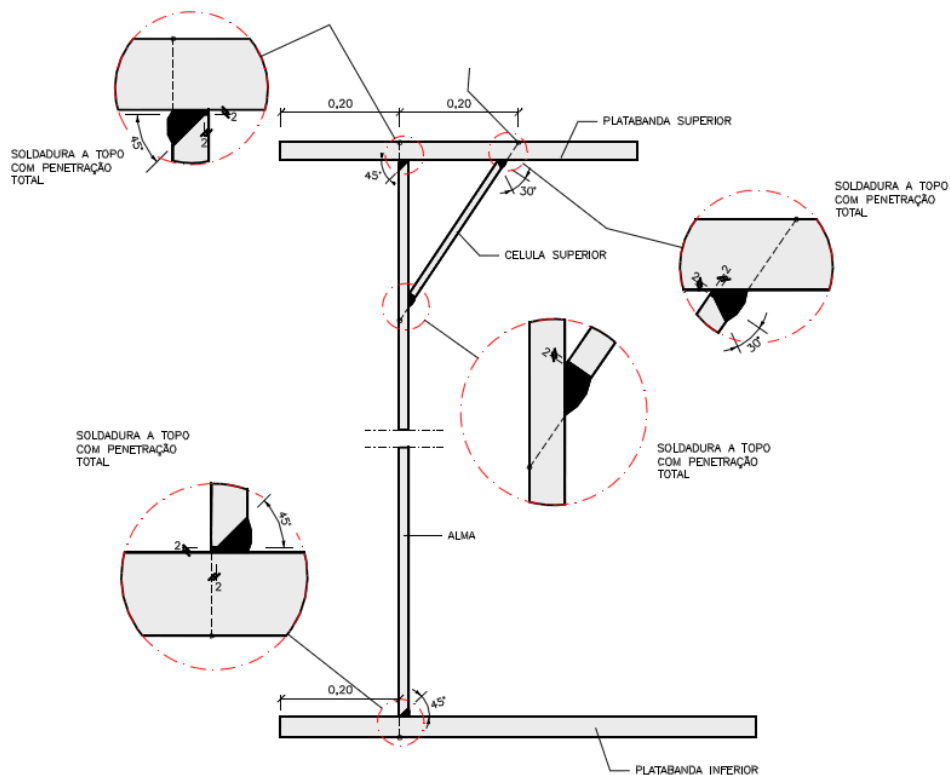


Figura 5.25 – Descrição do tipo de soldadura das ligações na secção bi-viga (Adaptado de Freitas(2014))

As ligações transversais que materializam a união entre os elementos de alma, banzos superiores e inferiores conferindo monolitismo e funcionamento conjunto destes elementos, constituem também ligações soldadas a topo, tal como se pode observar na imagem da Figura 5.26.

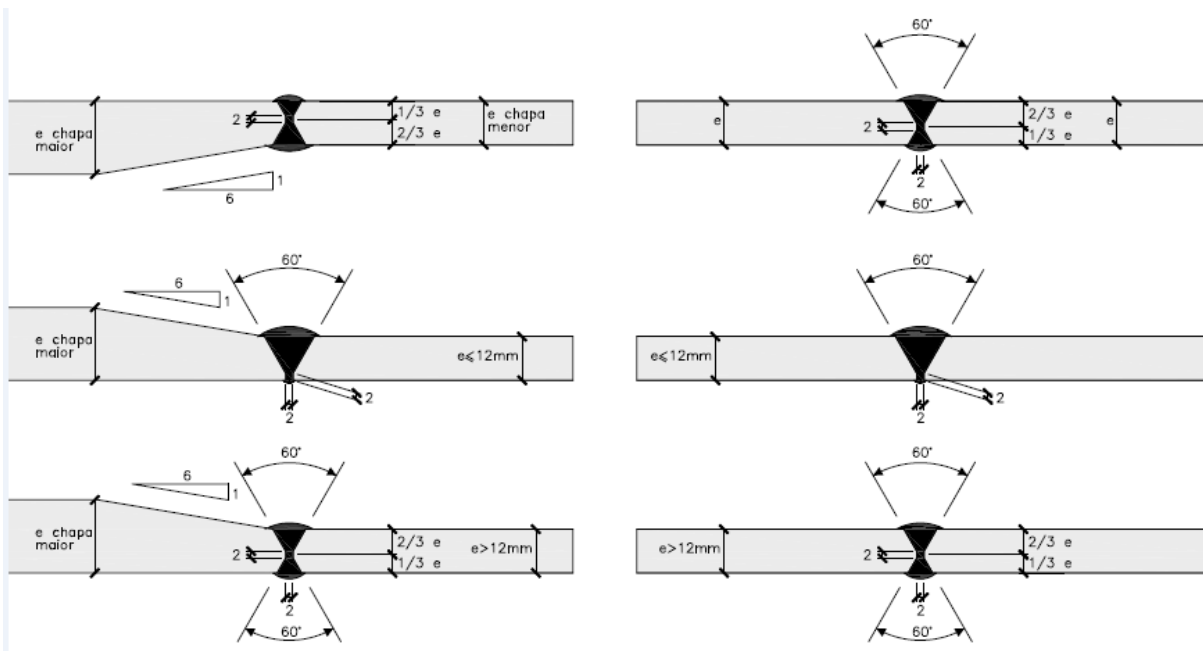
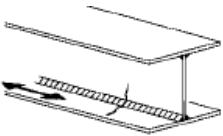
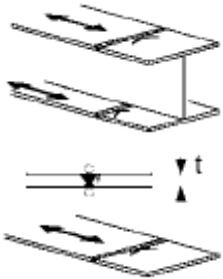


Figura 5.26 – Exemplos de soldaduras transversais entre elementos de diferentes espessuras (Adaptado de Freitas (2014))

Na Tabela 5.1 encontram-se classificados de acordo com as tabelas presentes na EN1993-1-9 (2010) todos os pormenores referidos bem como a respetiva categoria de pormenor.

Tabela 5.1 – Classificação dos pormenores a analisar de acordo com a EN1993-1-9

Detalhe	Pormenor EC3	Categoria de pormenor	Observações
1/2/3/4/5/6		100	Pormenor 1/3/5 da Tabela 8.2 do EC3-1-9.
		112	Dependendo das condições de execução
		125	o pormenor toma diferentes categorias.
7/8/9		36	Pormenor 1/5/11/13 da Tabela 8.3 do EC3-1-9.
		71	
		80	Dependendo das condições de execução
		90	o pormenor toma diferentes categorias.
		112	

Como se pode verificar na Tabela 5.1, os pormenores de soldaduras longitudinais são pormenores usualmente de categoria superior a 100, não constituindo pormenores críticos, já que possuem elevada resistência mesmo nas piores condições de execução. Já os pormenores transversais são pormenores que podem facilmente atingir uma baixa categoria, se a sua execução ou desenho não for apropriado. É portanto neste último ramo de pormenores que se centrará a análise apresentada neste capítulo, mais precisamente no pormenor de ligação transversal da banzo inferior e ligação transversal de chapas de fundo do caixão, tomando-se o pior cenário ou seja categoria de pormenor 71, já que a categoria inferior é muito rara e altamente evitável.

É também importante referir que apenas se analisarão as secções de centro de vão de cada vão, uma vez que as secções de apoio, pela sua robustez, não parecem ser secções preocupantes do ponto de vista de Fadiga, segundo Freitas (2014).

5.4 REAJUSTE SECCIONAL DE ACORDO COM O EUROCÓDIGO

5.4.1. IAP98 V.S. EN1991-2

As Pontes descritas no presente capítulo constituem estruturas dimensionadas para as sobrecargas concomitantes com a norma em vigor na altura do seu dimensionamento, neste caso a norma Espanhola IAP98 – “*Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*”. No entanto, as sobrecargas rodoviárias presentes na IAP98 (1998) são distintas daquelas que se encontram atualmente em vigor no Eurocódigo 1- Parte 2. Por forma a facilitar a sua comparação, encontram-se resumidas nas Tabelas 5.2 e 5.3 as sobrecargas rodoviárias prescritas tanto na IAP98 (1998) como na EN1991-2 (2003), respetivamente. A configuração dos veículos pesados das duas normas encontra-se representada na Figura 5.27.

Tabela 5.2 – Ações de sobrecarga rodoviária prescritas na IAP98 (1998)

IAP98		
	Tabuleiro < 12 m	Tabuleiro > 12 m
UDL [kN/m ²]	4	4
Veículo Pesado [600kN]	6x100	6x100 ou 12x100

Tabela 5.3 – Ações de sobrecarga rodoviária prescritas na EN1991-2 (2003)

EN1991-2		
Caso	Veículo Pesado [kN]	UDL [kN/m ²]
Notional Lane 1	4x150	9
Notional Lane 2	4x100	2.5
Notional Lane 3	4x50	2.5
Outras Notional Lanes	0	2.5
Área Remanescente	0	2.5

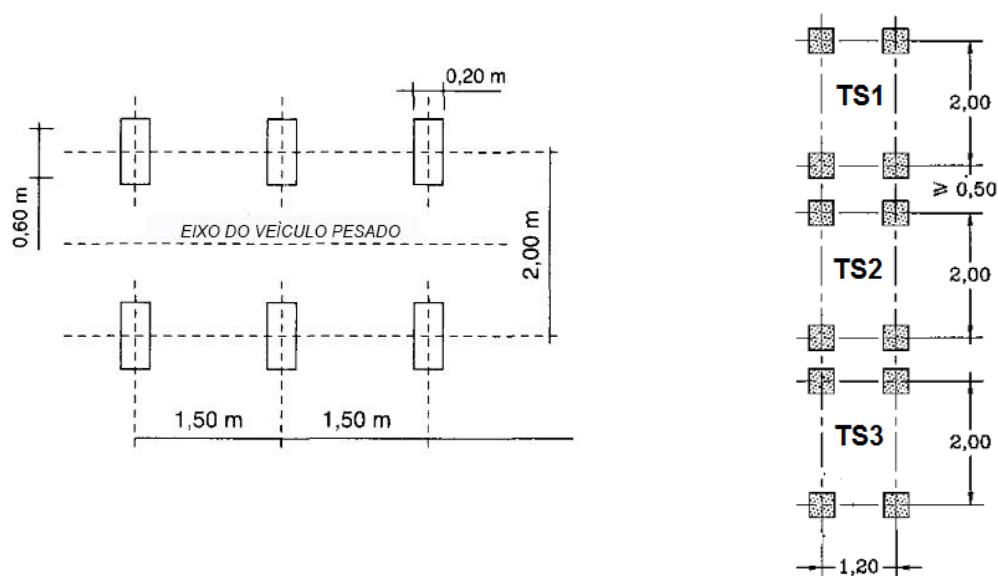


Figura 5.27 – Configuração do veículo pesado da IAP98 (esquerda) e EN1991-2 (direita)

Como se pode constatar da análise das Tabelas 5.2 e 5.3, as sobrecargas rodoviárias presentes na IAP98 são menos exigentes para larguras de tabuleiros inferiores a 12m de largura útil de circulação, esbatendo-se esta diferença à medida que a dimensão do tabuleiro aumenta, e tornando-se, a partir de certas dimensões, mais exigente do que a EN1991-2. Considere-se como exemplo as sobrecargas rodoviárias apresentadas na Tabela 5.4, definidas para tabuleiros com larguras de 12 e 18 m, respetivamente:

Tabela 5.4 – Comparação entre a norma IAP98 e EN1991-2

Exemplo comparativo de sobrecargas – IAP98 vs EN1991-2			
		12 m	18 m
IAP98	UDL[kN/m ²]	12x4=48	18x4=72
	V.P. [kN]	600	1200
EN1991-2	UDL[kN/m ²]	9x3+2.5x9=49.5	3x9+15x2.5=64.5
	V.P. [kN]	1200	1200

Para pontes com dimensões de tabuleiro inferiores a 12 m de largura útil de circulação, gama na qual se inserem as pontes analisadas no presente capítulo, a EN1991-2 é, como se pode verificar na Tabela 5.4, mais exigente, pois comanda a aplicação de três veículos pesados totalizando 1200 kN, enquanto que na IAP98 este valor se via reduzido a metade. O mesmo sucede com a sobrecarga distribuída, pois quanto menor a dimensão do tabuleiro, mais peso toma a parcela de 9 kN/m² comparativamente com a parcela imposta pela IAP98 de 4 kN/m².

5.4.2. CRITÉRIOS DE REDIMENSIONAMENTO

Tendo em conta o exposto anteriormente, e para que a análise à fadiga através do Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2 fosse o mais coerente possível, procedeu-se ao redimensionamento das secções de centro de vão de cada uma das pontes analisadas.

Este redimensionamento teve em conta as sobrecargas presentes na EN1991-2 (2003), tendo sido efetuado de acordo com a resistência em Estado Limite Último (excluindo a fadiga) (EC0 – 6.4), assim como tendo em conta o nível de tensões em serviço para a respetiva combinação indicada em EC0 – 6.5.3. a).

O procedimento e os critérios de redimensionamento das secções encontram-se explicitados de seguida:

- As secções usadas para obtenção de esforços no modelo computacional foram as secções originais de projeto;
- Todas as quantidades de armadura passiva, bem como de conetores de pernos, se mantiveram constantes;
- As dimensões da laje de betão, assim como as dimensões das células superiores e inferiores, e também as dimensões de largura dos banzos superiores e inferiores não sofreram qualquer alteração.
- A altura total da secção (laje e aço estrutural) de partida usada para vãos que não os originais de projeto, variam de acordo com o comprimento do maior vão na proporção de 1/24.

Posto isto, apresentam-se de seguida três exemplos numéricos para cada uma das pontes abordadas tendo em conta as condições de projeto originais.

5.4.3. EXEMPLO 1 – REDIMENSIONAMENTO DA SECÇÃO DE CENTRO DE VÃO DA PONTE TRES CANTOS

- Características Geométricas e Materiais

- Vão – 45,50m
- $H_{\text{secção}} - 1,65\text{m} + 0,25\text{m} (=45,50/24)$
- Betão C30
- Aço Estrutural S355

- Cargas Permanentes e Restantes Cargas Permanentes consideradas

- Peso Próprio Aço Estrutural – $150 \text{ kg/m}^2 \times 10,6\text{m} = 15,9 \text{ kN/m}$
- Peso Próprio Laje Betão – $25 \text{ kN/m}^3 \times 0,25 \text{ m} \times 10,6\text{m} = 66,25 \text{ kN/m}$
- Peso Próprio Betão de Fundo – N/A
- RCP (Pavimento, Barreiras, Vigas de bordo, Passeios) – 55,56 kN/m
- Total (P.P. + RCP) – 137,71 kN/m

As cargas permanentes e restantes cargas permanentes apresentadas acima correspondem às cargas originais de projeto, já que estas não sofreram alteração na EN1991-2. O valor do peso próprio do aço não é conhecido à partida, pois não se conhecem as dimensões das chapas necessárias para resistir aos esforços. No entanto, a experiência prática dita que este valor se aproxima dos 150 kg/m^2 de tabuleiro, para pontes com vãos de comprimento médio, sendo superior ou inferior a este valor para vãos maiores ou menores, respetivamente.

As sobrecargas rodoviárias, assim como o procedimento de aplicação das mesmas, foram definidas de acordo com o “*Load Model 1*”, presente na EN1991-2 (2003).

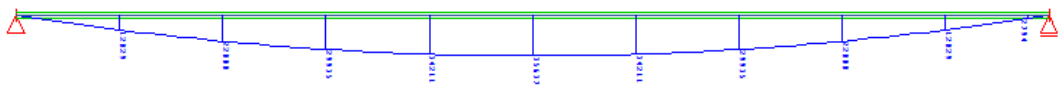
- Sobrecargas rodoviárias da EN1991-2

- Número de “*Notional Lanes*” – $\frac{10,60 - 2 \times 0,30 - 2 \times 1}{3} = 2,67 \rightarrow 2$ “*Notional Lanes*”
- Sobrecarga uniforme distribuída – $3 \times 9 + 2,5 \times 5 = 39,5 \text{ kN/m}$
- Sobrecarga veículo pesado – $4 \times 150 + 4 \times 100 = 1000 \text{ kN}$

- Envolvente de esforços e esforços de dimensionamento

Aplicando as cargas no modelo numérico, resumem-se na Tabela 5.5, os resultados obtidos.

Tabela 5.5 – Resumo de esforços e esforços de dimensionamento



	Envolvente de Esforços	Esforços Dimensionamento
	M_k [kN.m]	M_{Ed} [kN.m]
P.P. + RCP	35637	$35637 \times 1,35 = 48109,95$
Sobrecarga uniforme + sobrecarga veículo pesado	21272	$21272 \times 1,35 = 28717,2$
	$Ed = 1,35 \times Gk + 1,35 \times Q$	76827

- Validação de resultados

O momento fletor a meio vão aproximado devido a P.P.+RCP é dado pela expressão (5.1),

$$M = \frac{P \times L^2}{8} = \frac{37,71 \times 45,5^2}{8} = 35636,8 \text{ kN.m} \quad (5.1)$$

O momento fletor a meio vão aproximado devido a sobrecarga uniforme + veículo pesado é dado pela equação (5.2),

$$M = \frac{P \times L^2}{8} + \frac{P_{\text{veículo}}}{2} \times \frac{L}{2} = \frac{37,71 \times 45,5^2}{8} + \frac{1000}{2} \times \frac{45,5}{2} = 22243,8 \text{ kN.m} \quad (5.2)$$

Encontrando-se validados os resultados obtidos, procede-se à determinação da espessura de chapa de fundo necessária para resistir ao esforço de tração gerado pelo binário de forças na secção.

- Determinação da espessura da chapa de fundo

Dadas as dimensões da laje e da estrutura metálica, é habitual que o eixo neutro se encontre dentro do banzo, ou seja, da laje e, portanto, desprezando a contribuição da armadura passiva, o momento resistente da secção é aproximadamente dado pela expressão (5.3),

$$M_R = F_t \times Z \quad (5.3)$$

Assumindo que o eixo neutro se encontra na laje (ou muito próximo), e atribuindo um valor a, Z (equação (5.5)), determina-se a força de tração atuante na chapa de fundo (Figura 5.28). A altura total da secção é usualmente cerca de 24 vezes menor que o comprimento do vão ((5.4)) para que tenha uma esbelteza adequada. Assim procede-se à obtenção da força de tração gerada pelo momento fletor através da equação (5.6).

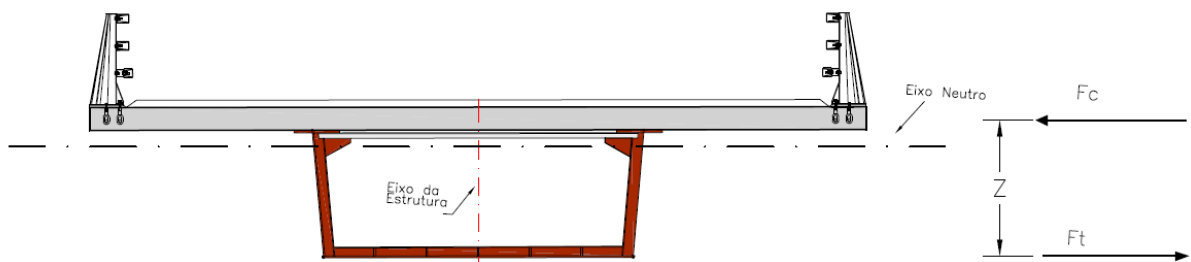


Figura 5.28 – Representação esquemática do binário de forças resistente gerado na secção transversal

$$H_{\text{secção}} \approx \frac{45,5}{24} = 1,9 \text{ m} \quad (5.4)$$

$$Z = 1,9 - \frac{e_{\text{laje}}}{2} = 1,9 - \frac{0,25}{2} = 1,775 \text{ m} \quad (5.5)$$

$$F_t = \frac{M_{Ed}}{Z} \quad (5.6)$$

Conhecendo a força de tração necessária para resistir ao momento atuante, e assumindo um aço estrutural de classe S355 determina-se a área total da chapa de fundo mediante a equação (5.7),

$$A_{chapa} = \frac{F_t}{355000} \quad (5.7)$$

Uma vez que as dimensões de largura do caixão se mantêm constantes, e sabendo que a chapa de fundo original mede 3,5m de comprimento, a espessura da chapa será dada por (5.8).

$$e_{chapa} = \frac{A_{chapa}}{3,5} \quad (5.8)$$

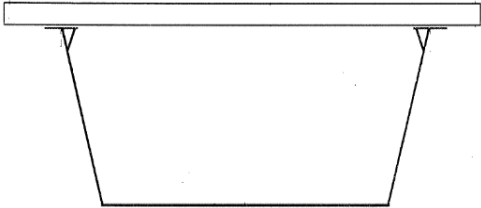
- Resultados e características seccionais finais

Nas Tabelas 5.6 e 5.7 sistematizam-se as cargas e sobrecargas aplicadas assim como as características seccionais da secção original de projeto e da secção final, respetivamente.

Tabela 5.6 – Resumo de cargas e sobrecargas aplicadas

Cargas e Sobrecargas	
Peso próprio metal estrutural	150 kg/m ² x 10,60m =15,9 kN/m
Peso próprio betão de fundo	0
Peso próprio da laje	25kN/m ³ x 0,25 m x 10,60m =66,25 kN/m
Restantes cargas permanentes	55,56 kN/m
Sobrecarga distribuída	3 x 9kN/m ² + 5 x 2,5kN/m ² = 39,5 kN/m ²
Sobrecarga veículo pesado	4 x 150 kN + 4 x 100kN= 1000 kN
 M _{Ed} [kN.m]	 76827

Tabela 5.7 – Características da secção original e final

Características seccionais					
					
Secção original de projeto			Secção redimensionada		
Elemento	B [cm]	H [cm]	Elemento	B [cm]	H [cm]
Laje	1060	25	Laje	1060	25
Armadura	53 ϕ 12		Armadura	53 ϕ 12	
² xBanzo. Sup.	80	1,5	² xBanzo. Sup.	80	1,5
² xAlma	2	160,5	² xAlma	2	160
Banzo. Inf.	350	3,0	Banzo. Inf.	350	3,5
M_{Rd}	73689 kN.m		M_{Rd}	83340 kN.m	

Como se pode verificar através da análise da Tabela 5.7, as sobrecargas definidas na EN1991-2 (2003) conduzem a um aumento da espessura da chapa de fundo. Assim, encontrando-se definidas as dimensões necessárias para resistir aos esforços em Estado Limite Último (excluindo a fadiga), será verificado o nível das tensões em serviço, tendo em conta o método construtivo e o faseamento do mesmo.

O método construtivo mais usual nesta tipologia de pontes corresponde a uma construção faseada não escorada. De uma forma simplista, este método consiste na colocação por troços, da secção metálica, seguindo-se a betonagem da laje, que dependendo da largura do tabuleiro pode ser efetuado de uma só vez em toda a sua largura, ou não. Por fim procede-se à colocação do pavimento e das restantes cargas permanentes. Assim, tendo em conta o método construtivo referido, o nível de tensão em serviço foi verificado tendo em conta as propriedades mecânicas da secção em cada fase, seguindo o seguinte encadeamento,

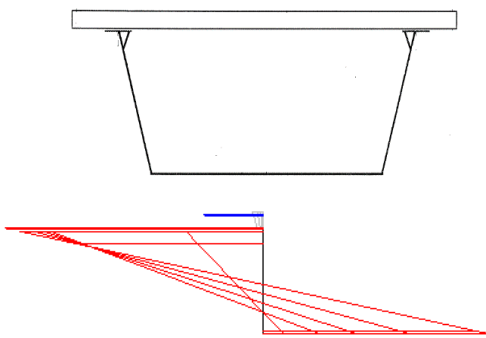
- Peso próprio do metal sobre a estrutura metálica;
- Peso próprio da laje sobre a estrutura metálica;
- Restantes cargas permanentes sobre a estrutura mista;
- Sobrecarga rodoviária sobre a estrutura mista;

Por comodidade na execução deste cálculo sequencial de tensões, foi usado o software de cálculo, “CSEC”, desenvolvido pela empresa de projeto de pontes e estruturas especiais, IDEAM S.A. Este software foi desenvolvido precisamente para realizar este tipo de cálculo seccional nas diversas situações de projeto de pontes mistas.

Na Tabela 5.8, encontram-se os resultados do cálculo elástico de tensões nas diferentes fases de robustez da secção. O cálculo foi efetuado para a combinação característica de ações de acordo com a EN1990 – 6.5.3 – a) (2009).

Tabela 5.8 – Tensões na fibra superior e inferior de acordo com sequência de aplicação de cargas

Estrutura Metálica			Representação Esquemática
P.P. Metal	-96,2 MPa	24,4 Mpa	
P.P. Betão de Fundo	0 MPa	0 Mpa	
P.P. Laje	-276,1 MPa	111,7 MPa	
Estrutura Mista			
RCP	-290 Mpa	176 Mpa	
Sobrecarga	-310,6 Mpa	270 MPa	



Como se pode verificar da análise da Tabela 5.8 os valores das tensões acumuladas, para a combinação característica de ações, cumprem o limite usual de projeto de $0,9x_{fy}$, confirmando a adequabilidade da solução transversal.

5.4.4. **EXEMPLO 2** – REDIMENSIONAMENTO DA SECÇÃO DE CENTRO DE VÃO DA PONTE FORNELLS**- Características Geométricas e Materiais**

- Vãos – 25m + 45m + 25m
- $H_{\text{Secção}} - 1,42\text{m} + 0,28\text{m} (\approx 45/26)$
- Betão C35
- Aço S355

- Cargas Permanentes e Restantes Cargas Permanentes consideradas

- Peso Próprio Aço Estrutural – $150 \text{ kg/m}^2 \times 12,35\text{m} = 18,53 \text{ kN/m}$
- Peso Próprio Laje Betão – $25 \text{ kN/m}^3 \times 0,28 \text{ m} \times 12,35\text{m} = 86,45 \text{ kN/m}$
- Próprio Betão de Fundo – $25 \text{ kN/m}^3 \times (5-2 \times 0,25) \text{ m} \times 0,30\text{m} = 33,75 \text{ kN/m}$
- RCP (pavimento, barreiras, vigas de bordo, passeios) – 50,89 kN/m
- Total (P.P. + RCP) s/Betão de fundo – 155,87 kN/m
- Total (P.P. + RCP) c/Betão de fundo – 189,62 kN/m

As cargas permanentes e restantes cargas permanentes, tal como no caso anterior não sofreram qualquer alteração relativamente ao projeto original. Neste caso, dado que é uma estrutura contínua, existe um incremento de carga nas zonas de predomínio de flexão negativa correspondente à camada de betão de fundo.

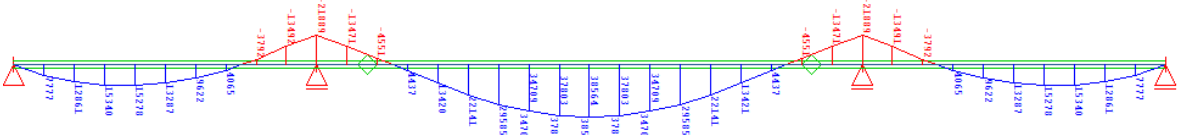
- Sobrecargas rodoviárias da EN1991-2

- Número de “*Notional Lanes*” – $\frac{(12,35-0,80-1,05)}{3} = 3,5 \rightarrow 3$ “*Notional Lanes*”
- Sobrecarga uniforme distribuída – $3 \times 9 + 2,5 \times 7,5 = 45,75 \text{ kN/m}$
- Sobrecarga veículo pesado – $4 \times 150 + 4 \times 100 + 4 \times 50 = 1200 \text{ kN}$

- Envoltente de esforços de dimensionamento

Aplicando as cargas referidas no modelo numérico, resumem-se na Tabela 5.9, os resultados obtidos.

Tabela 5.9 - Resumo de esforços e esforços de dimensionamento



	Envoltente de Esforços	Esforços Dimensionamento
	My [kN.m]	Med [kN.m]
P.P + RCP	15451	$15451 \times 1,35 = 20858,9$
Sobrecarga uniforme + sobrecarga veículo pesado	13116	$13116 \times 1,35 = 17706,6$
	$Ed = 1,35 \times Gk + 1,35 \times Q$	38566

- Validação de Resultados

O momento fletor aproximado a meio vão do vão central, devido a P.P.+RCP é dado por,

- Assumindo a ausência da camada de betão de fundo,

$$M = \frac{P \times L^2}{8} - \frac{P \times L^2}{12} = \frac{155,87 \times 45^2}{8} - \frac{155,87 \times 45^2}{12} = 13151,5 \text{ kN.m} \quad (5.9)$$

- Assumindo que a camada de betão de fundo existe ao longo de todo o vão central,

$$M = \frac{P \times L^2}{8} - \frac{P \times L^2}{12} = \frac{189,62 \times 45^2}{8} - \frac{189,62 \times 45^2}{12} = 15999,2 \text{ kN.m} \quad (5.10)$$

O momento fletor aproximado a meio vão, devido à sobrecarga uniforme + veículo pesado, é dado por (5.11),

$$\begin{aligned} M &= \left(\frac{P \times L^2}{8} - \frac{P \times L^2}{12} \right) + \left(\frac{P_{TOTAL \text{ VEÍCULO}}}{2} \times \frac{L}{2} - P_{TOTAL \text{ VEÍCULO}} \times \frac{L}{8} \right) = \\ &= \left(\frac{45,75 \times 45^2}{8} - \frac{45,75 \times 45^2}{12} \right) + \left(\frac{1200}{2} \times \frac{45}{2} - 1200 \times \frac{45}{8} \right) = \\ &= 10610,2 \text{ kN.m} \end{aligned} \quad (5.11)$$

O cálculo simplificado leva a resultados aproximados em ambos os casos, tornando os valores do cálculo do modelo razoáveis e credíveis.

É importante referir, que para a obtenção dos resultados do modelo, foram usadas as propriedades mecânicas correspondentes às secções de projeto original, em estado fissurado ou bruto, dependendo da predominância do tipo de flexão. Estas propriedades não foram redefinidas nos novos modelos usados para o estudo paramétrico realizado em 5.5.4.3, pelo facto de esta alteração conduzir a esforços muito pouco distintos.

- Determinação da espessura da chapa de fundo

A espessura da chapa de fundo necessária para resistir ao momento atuante em Estado Limite Último (excluindo a Fadiga) é obtida usando o mesmo procedimento do *Exemplo 1*, alterando-se apenas as dimensões de altura e consequentemente o braço do binário resistente mobilizado.

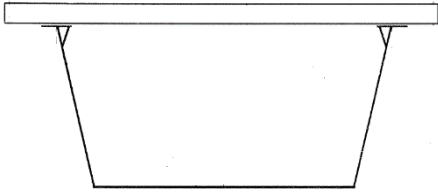
- Resultados e características seccionais finais

Nas Tabelas 5.10 e 5.11 sistematizam-se as cargas e sobrecargas aplicadas assim como as características da secção. Neste caso a espessura da chapa de fundo mantém-se relativamente à secção original pelo que apenas se apresentam as características da secção original.

Tabela 5.10 – Resumo de cargas e sobrecargas aplicadas

Cargas e Sobrecargas	
Peso Próprio Metal Estrutural	$150 \text{ kg/m}^2 \times 12,35 = 18,53 \text{ kN/m}$
Peso Próprio Betão de Fundo	$25 \text{ kN/m}^3 \times 4,5\text{m} \times 0,30 \text{ m} = 33,75 \text{ kN/m}$
Peso Próprio Laje	$25\text{kN/m}^3 \times 0,28 \text{ m} \times 12,35\text{m} = 86,45 \text{ kN/m}$
Restantes Cargas Permanentes	50,89 kN/m
Sobrecarga Distribuída	$3 \times 9\text{kN/m}^2 + 7,5 \times 2,5\text{kN/m}^2 = 45,75 \text{ kN/m}$
Sobrecarga Veículo Pesado	$4 \times 150 \text{ kN} + 4 \times 100\text{kN} + 4 \times 50 = 1200 \text{ kN}$
$M_{Ed} [\text{kN.m}]$	38566

Tabela 5.11 – Características da secção

Características Seccionais		
		
Elemento	B [cm]	H [cm]
Laje	1235	28
Armadura	82 ϕ 16	
^{2x} Banzo. Sup.	80	1,5
^{2x} Cel. Sup	2,11	23,5
^{2x} Alma	2,2	139,3
Banzo. Inf.	500	1,2
M_{Rd}	43223 kN.m	

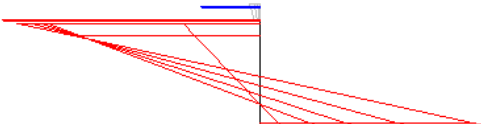
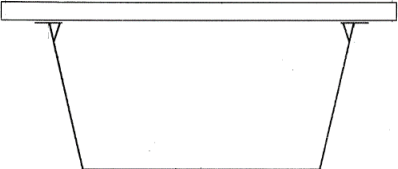
Como se pode verificar da análise da Tabela 5.11, as sobrecargas definidas na EN1991-2, não conduzem a alterações na secção, pelo que se considerou serem as suas dimensões adequadas. Será agora verificado o nível das tensões em serviço assumindo o método construtivo detalhado no *Exemplo 1*. Assim, as tensões em serviço serão novamente calculadas tendo em conta o faseamento construtivo da estrutura, e as diferentes fases de robustez das secções seguindo o seguinte encadeamento,

- Peso Próprio do Metal sobre a estrutura metálica;
- Peso Próprio da Laje sobre a estrutura metálica;
- Restantes Cargas Permanentes sobre a estrutura mista;
- Sobrecarga Rodoviária sobre a estrutura mista;

Novamente, recorrendo ao software “CSEC” procedeu-se à sobreposição das tensões obtidas em cada fase, por forma a verificar o nível de tensão final na secção, apresentando-se os resultados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Tensões na fibra superior e inferior de acordo com sequência de aplicação de cargas

Estrutura Metálica		
P.P. Metal	-44,2 MPa	16,8 Mpa
P.P. Betão de Fundo	-80,4 MPa	30,6 Mpa
P.P. Laje	-191,7 MPa	72,9 MPa
Estrutura Mista		
RCP	-193 Mpa	120,7 Mpa
Sobrecarga	-197,3 MPa	240,2 MPa



Como se pode observar pelos valores da Tabela 5.12, e à semelhança do caso anterior, as tensões acumuladas para a combinação característica de ações, encontram-se dentro de valores adequados.

5.4.5. EXEMPLO 3 – REDIMENSIONAMENTO DA SECÇÃO DE CENTRO DE VÃO DA PONTE UTE NUENO

- Características geométricas e materiais

- Vão – 40m + 60m + 40m
- $H_{\text{Secção}}$ – Variável – 1,70m + 0,30m (1/30) zona de centro de vão 2,70m + 0,30 (1/20) na zona de apoio
- Betão C30
- Aço S355

- Cargas permanentes e restantes cargas permanentes consideradas

- P.P. do aço em zona de vão - $180 \text{ kg/m}^2 \times 11,80\text{m} = 21,24 \text{ kN/m}$ (Metade por viga)
- P.P. do aço em zona de apoio - $205 \text{ kg/m}^2 \times 11,80\text{m} = 24,19 \text{ kN/m}$ (Metade por viga)
- Peso próprio laje betão - $25 \text{ kN/m}^3 \times 0,30 \text{ m} \times 11,80\text{m} = 88,50 \text{ kN/m}$ (Metade por viga)
- P. P. Placas pré-fabricadas - $25 \text{ kN/m}^3 \times (6-1,05) \text{ m} \times 0,07\text{m} = 8,66 \text{ kN/m}$ (Metade por viga)
- P.P. Betão de fundo - $25 \text{ kN/m}^3 \times (6-0,60) \text{ m} \times (0,25+0,50)/2\text{m} = 50,625 \text{ kN/m}$ (Metade por viga)
- RCP (Pavimento, Barreiras) - $42,60 \text{ kN/m}$ (Metade por viga)
- Total (P.P. + RCP) Zona de vão - 161 kN/m (Metade por viga)
- Total (P.P. + RCP) Zona de Apoio - $205,92 \text{ kN/m}$ (Metade por viga)

Apesar de neste caso as cargas permanentes e restantes cargas permanentes corresponderem às cargas originais de projeto, possuem algumas particularidades relativamente aos exemplos anteriores. O facto de esta ponte pertencer à tipologia bi-viga, leva à existência de lajes pré-fabricadas colocadas entre as vigas metálicas por forma a “fechar” o fundo da secção. A existência destes elementos acarreta um acréscimo de uma carga que não existia nos casos anteriores.

Além disso, o facto de a secção ser de altura variável, conduz a uma alteração da camada de betão de fundo, levando a que também esta varie a sua espessura em concordância com a variação da altura da secção. Esta variação da espessura da camada de betão de fundo corresponde à introdução de uma carga trapezoidal no modelo de cálculo, no entanto esta foi aqui definida com valor médio por simplificação. Finalmente, o peso próprio da secção de aço acarreta também um acréscimo de carga de 25 kg/m^2 nas zonas de maior dimensão da secção.

- Sobrecargas rodoviárias da EN1991-2

- Número de “*Notional Lanes*” - $\frac{(11,80-2 \times 0,65)}{3} = 3,50 \rightarrow 3$ “*Notional Lanes*”
- Sobrecarga uniforme distribuída - $3 \times 9 + 2,5 \times 7,5 = 45,75 \text{ kN/m}$
- Sobrecarga veículo pesado - $4 \times 150 + 4 \times 100 + 4 \times 50 = 1200 \text{ kN}$

É importante referir que as sobrecargas mencionadas são referentes às sobrecargas totais existentes no tabuleiro. Para efeito de obtenção de esforços e modelação das ações, a aplicação da sobrecarga foi efetuada de acordo com a linha de influência transversal correspondente à máxima reação numa das vigas (Figura 5.29), tal como esquematizado nas Figuras 5.30 e 5.31. Esta reação foi aplicada como carga distribuída longitudinal, por forma a obter o maior esforço de flexão possível.

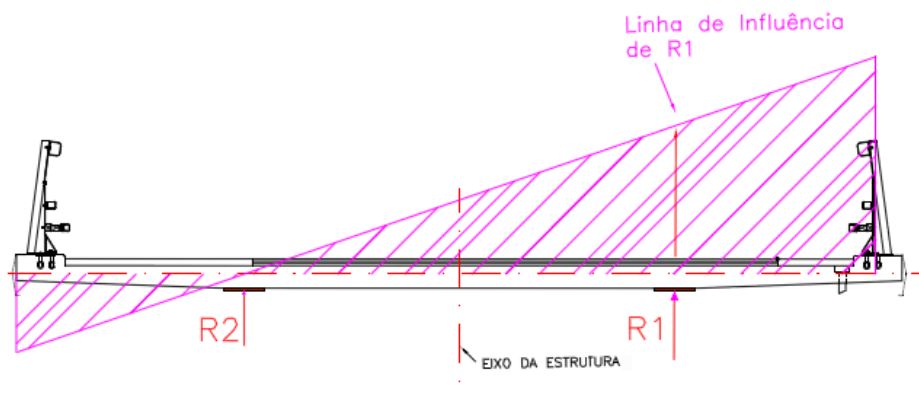


Figura 5.29 – Linha de influência de R1

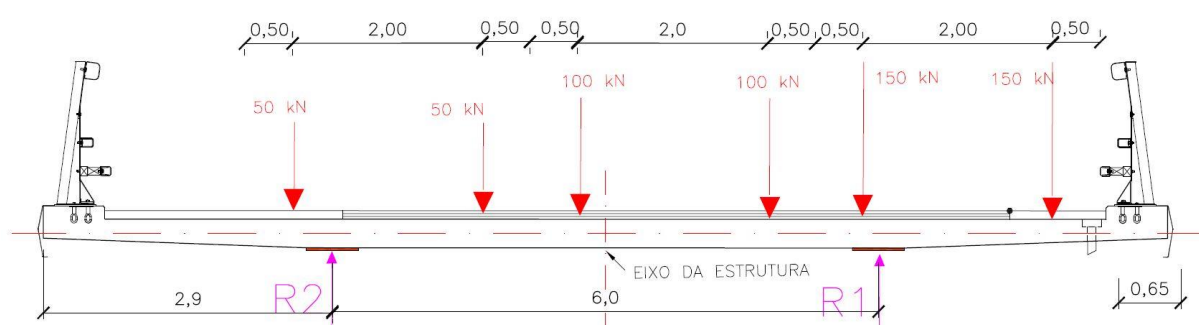


Figura 5.30 – Posição dos veículos pesados do modelo LM1 no tabuleiro

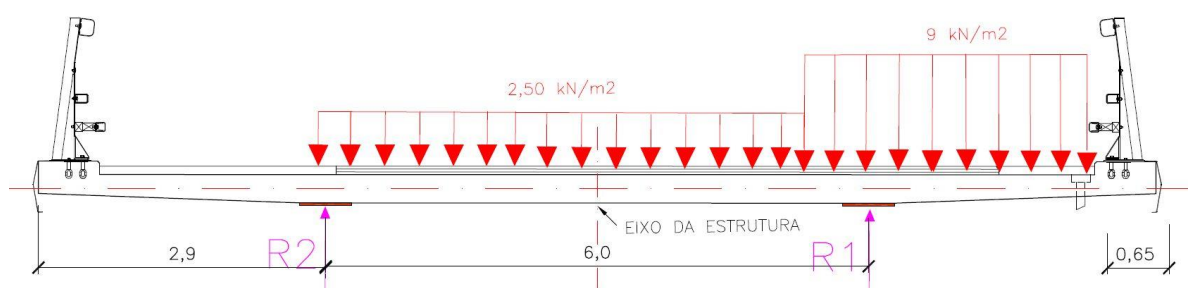


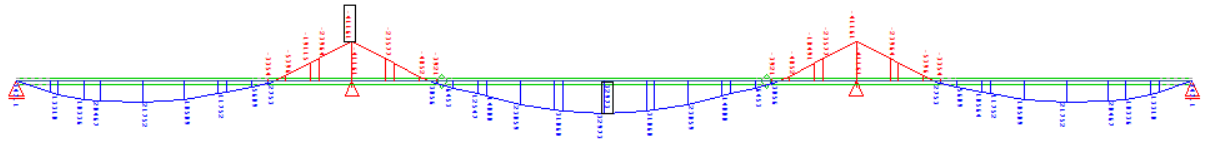
Figura 5.31 – Posição da UDL de acordo com a linha de influência de R1

- $R1_{MAX}$ para Sobrecarga Uniforme Distribuída – 34,215 kN/m
- $R1_{MAX}$ para sobrecarga de Veículo Pesado – 475 kN/eixo de veículo pesado

- Envolvente de esforços e esforços de dimensionamento

Aplicando as cargas referidas no modelo numérico, resumem-se nas Tabelas 5.13, os resultados obtidos.

Tabela 5.13 - Resumo de esforços e esforços de dimensionamento



	Envolvente de Esforços	Esforços Dimensionamento
	My [kN.m]/ Viga	Med [kN.m]/ Viga
P.P + RCP	12773,4	12773,4x1,35 = 17244,1
Sobrecarga uniforme + sobrecarga veículo pesado	11651	11651x1,35 = 15728,9
	Ed = 1,35xGk + 1,35xQ	32973

- Validação de Resultados

O momento fletor aproximado a meio vão, devido a P.P.+RCP é dado pela equação (5.12),

$$M = \left(\frac{P \times L^2}{8} - \frac{P \times L^2}{12} \right) = \left(\frac{80,5 \times 60^2}{8} - \frac{80,5 \times 60^2}{12} \right) =$$

$$= 12075 \text{ kN.m/Viga} \quad (5.12)$$

O momento fletor aproximado a meio vão, devido à sobrecarga uniforme + veículo pesado, é dado por (5.13),

$$M = \left(\frac{P \times L^2}{8} - \frac{P \times L^2}{12} \right) + \left(\frac{P_{VeiculoR1}}{2} \times \frac{L}{2} - P_{VeiculoR1} \times \frac{L}{8} \right) =$$

$$= \left(\frac{34,215 \times 60^2}{8} - \frac{34,215 \times 60^2}{12} \right) + \left(\frac{950}{2} \times \frac{60}{2} - 950 \times \frac{60}{8} \right) =$$

$$= 12257,3 \text{ kN.m/Viga}$$

Encontrando-se validados os resultados obtidos através do modelo, procede-se à determinação da espessura necessária da chapa de fundo para resistir ao esforço de tração gerado.

- Determinação da espessura da chapa de fundo necessária

Todo o procedimento mencionado nos exemplos anteriores se mantém válido também para este caso, com a particularidade de o momento fletor obtido anteriormente pertencer a uma viga apenas, pelo que as dimensões da secção correspondem a meia secção.

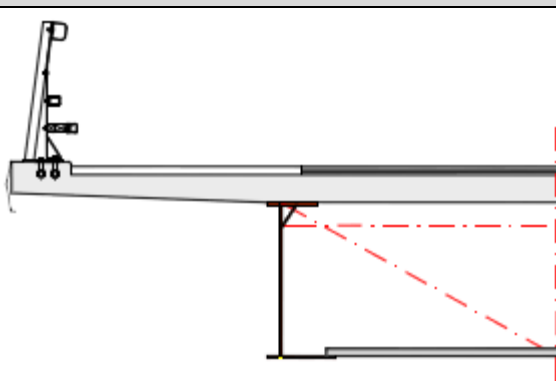
- Resultados e características seccionais

Nas Tabelas 5.14 e 5.15 sistematizam-se as cargas e sobrecargas aplicadas assim como as características da secção. Neste caso a espessura da chapa de fundo mantém-se relativamente à secção original pelo que apenas se apresentam as características da secção original.

Tabela 5.14 – Resumo de cargas e sobrecargas aplicadas

Cargas e Sobrecargas	
Peso próprio metal estrutural	10,62 / 12,095 kN/m/Viga
Peso próprio placas /betão de fundo	4,33/25,31 kN/m/Viga
Peso próprio laje	44,25 kN/m/Viga
Restantes cargas permanentes	21,30 kN/m/Viga
Sobrecarga distribuída – R1max	34,215 kN/m
Sobrecarga veículo pesado – R1max	475 kN/eixo de V.P.
M_{Ed} [kN.m]	32973

Tabela 5.15 – Características da secção original e final

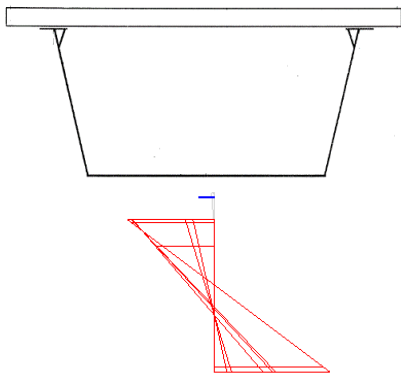
Características Seccionais		
		
Secção de Original de Projeto		
Elemento	B [cm]	H [cm]
Laje	590	30
Armadura	39 ϕ 12	
Banzo. Sup.	55	3
Cel. Sup	1,4	27
Alma	1,2	161,5
Banzo. Inf.	75	5,5
M_{Rd}	33292 kN.m	

Será agora verificado o nível das tensões em serviço, tendo em conta o método construtivo detalhado nos exemplos 1 e 2. As tensões serão novamente calculadas tendo em conta o faseamento construtivo da estrutura e as diferentes fases de robustez das secções, seguindo o seguinte encadeamento,

- Peso Próprio do Metal sobre a estrutura metálica;
- Peso Próprio da Laje sobre a estrutura metálica;
- Restantes Cargas Permanentes sobre a estrutura mista;
- Sobrecarga Rodoviária sobre a estrutura mista;

Novamente, recorrendo ao software “CSEC” procedeu-se à sobreposição das tensões obtidas em cada fase por forma a verificar o nível final destas na secção, apresentando-se os resultados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Tensões na fibra superior e inferior de acordo com sequência de aplicação de cargas

Estrutura Metálica			
P.P. Metal	-55,2 MPa	33 Mpa	
P.P. Betão de Fundo	-75,4 MPa	45 Mpa	
P.P. Laje	-212,4 MPa	127 MPa	
Estrutura Mista			
RCP	-215,1 Mpa	160,5 Mpa	
Sobrecarga	-226,3 Mpa	301,5 MPa	

Como se pode observar pelos valores da Tabela 5.16, tal como no caso anterior as tensões acumuladas para a combinação característica encontram-se dentro de valores adequados.

5.5 ANÁLISE À FADIGA

A análise à fadiga de uma ponte mista rodoviária pode ser concretizada mediante um dos métodos mencionados no Capítulo 3, sendo estes o Método do Dano Acumulado ou o Método da Tensão Equivalente de Dano, base do Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2.

Conhecidas já as vantagens e desvantagens inerentes à aplicação de cada um dos métodos mencionados, o principal objetivo da secção que se segue é apresentar um estudo completo do pormenor de ligação crítico através de ambas as metodologias de análise referidas. Como já referido em 5.3, o pormenor em que centrará a análise é o pormenor de ligação transversal de chapas de fundo, sendo este o pormenor que possui a menor categoria e que se encontra sujeito à maior variação de tensões. Desta forma será verificada não só a sua segurança da ligação mas também apresentada a categoria mínima necessária para garantir uma vida útil de 100 anos da estrutura.

A análise global à fadiga destas estruturas culmina com a comparação e discussão dos resultados obtidos, através de cada um dos métodos, para os comprimentos de vãos mais usuais no caso das pontes em caixão isostáticas, e no caso das pontes contínuas em caixão e bi-viga a discussão dos resultados da análise paramétrica efetuada, variando não só o comprimento do vão central mas também a proporção dos vãos laterais face a cada vão central estudado.

É importante referir que o estudo incorporado nesta secção se baseia na abordagem “Tempo de vida garantido”, descrita em 4.3, em conjunto com a aplicação do correspondente coeficiente γ_{Mf} igual a 1,35 à curva de Fadiga, por se tratar de uma ligação crítica cujo colapso originaria consequências graves na estrutura.

5.5.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DO DANO ACUMULADO

O Método do Dano Acumulado consiste, como já referido, na obtenção da parcela de dano correspondente à aplicação de um determinado intervalo de tensão de amplitude constante, através da razão entre o número de ciclos atuantes e o número de ciclos resistentes correspondente a esse mesmo intervalo de tensão, calculado através das curvas S-N. Para isto, é necessário conhecer não só o histórico de tensões real da secção alvo de análise, mas também a frequência de atuação da respetiva solicitação. Estes dados podem ser obtidos através de registos reais da frequência de passagem de veículos pesados, bem como das suas características de massa e dimensão, ou podem alternativamente ser simulados usando os valores de intensidade de tráfego e características dos veículos adequados ao modelo de cálculo, neste caso adequado ao Método do Dano Acumulado. Assim, por ser mais simples e conservativo optou-se pelo segundo método, recorrendo às diferentes intensidades de tráfego da EN1991-2 (2003) (Tabela 4.1), permitindo assim, não só escapar a eventuais suposições de tráfego erróneas, mas também normalizar os resultados para uma composição de tráfego Europeia, mantendo assim toda a análise à fadiga dentro das normas Europeias.

Como referido em 4.2, a EN1991-2 (2003) propõe cinco modelos de veículos de Fadiga, sendo o modelo quatro o mais adequado para aplicar conjuntamente com o Método do Dano Acumulado, pois permite supor, não só várias distribuições de composição de tráfego de veículos pesados, de acordo com a distância percorrida, mas também variar a Intensidade Média Diária de passagem dos mesmos. Este modelo é constituído por cinco tipologias de veículos representativos da composição do tráfego de pesados Europeu. Não obstante, para efeitos de estudos de comparação, usou-se para além do modelo quatro, o modelo três supondo que todo o tráfego pesado possuía características iguais às deste. As características dos modelos de carga FLM3 e FLM4 encontram-se na Figura 4.2 e Tabela 4.4 respetivamente.

Antes de prosseguir com a apresentação de quaisquer resultados, resumem-se de seguida os critérios de cálculo usados para aplicação do Método do Dano Acumulado,

- Os espectros de esforços foram obtidos tanto para o Modelo de carga FLM3 como para o modelo FLM4.
- A análise à Fadiga através deste método encontra-se, como já referido inicialmente, ao abrigo da abordagem de “Tempo de Vida garantida” em conjunto com o coeficiente γ_{MF} igual a 1,35.
- A vida útil fixou-se no período de 100 anos, tal como indicado EN1990, para as estruturas de pontes.
- Procedeu-se ao cálculo do dano para cada Intensidade Média Diária de Tráfego (Tabela 4.1) e para cada distribuição de composição de tráfego do modelo FLM4.
- O estudo foca apenas na ligação transversal de chapas de fundo, por constituir o Pormenor de categoria mais baixa, assumindo que esta se materializa na zona de momento fletor máximo, tanto no vão lateral como no vão central.
- O dano total foi obtido através da regra de dano linear de Palmgren-Miner, supondo todas as simplificações que lhe são inerentes (Capítulo 2).

5.5.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO SIMPLIFICADO DO EUROCÓDIGO 3 – PARTE 2

O método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2 é talvez a metodologia de cálculo à Fadiga mais apelativa, pela sua simplicidade e rapidez de aplicação, e carácter conservativo. A aplicação prática deste método consiste, tal como explicitado no Capítulo 3, na calibração do intervalo de tensão, obtido através de um modelo de carga adequado (FLM3), mediante coeficientes de correção que têm por objetivo ajustar o valor deste intervalo de tensão, tornando-o diretamente comparável com a categoria de pormenor em estudo. Por forma a efetuar uma análise de sensibilidade, para além da aplicação estrita do método para o veículo FLM3, ajustou-se também o coeficiente λ_2 (ver 4.4) aos diferentes pesos e frequências de passagem dos veículos pesados-tipo constituintes do modelo FLM4, com o propósito de simular o impacto de um tráfego caracteristicamente Europeu. As características dos veículos de Fadiga FLM3 e FLM4 encontram-se descritas no ponto anterior (Figura 4.2 e Tabela 4.4) e também em 4.2.

Concretizando, os critérios de cálculo inerentes à aplicação do método simplificado do EC3-2 baseiam-se nos seguintes princípios:

- Os valores da variação de esforços foram obtidos apenas através do modelo de carga FLM3, uma vez que é o modelo de carga adequado para obter oscilações de tensões máximas.
- O coeficiente λ_2 foi calculado, tanto para uma composição de tráfego com características iguais às do veículo FLM3, como para uma composição de tráfego constituída pelos veículos tipo do modelo FLM4.
- Procedeu-se ao cálculo da categoria necessária para a verificação de segurança, aplicando o método de forma estrita e, de forma alternativa, não considerando o efeito limitativo do coeficiente λ_{max} .
- Tal como no Método do Dano Acumulado, apenas se analisou a ligação transversal de chapas de fundo.
- A análise à Fadiga através deste método pressupõe, à semelhança do método anterior, a abordagem de “Vida garantida” com coeficiente γ_{MF} de 1,35.
- A vida útil fixou-se no período de 100 anos, tal como no caso do Método do Dano Acumulado.

5.5.3. PONTES CAIXÃO ISOSTÁTICAS

5.5.3.1 Método do Dano Acumulado

A aplicação do Método do Dano Acumulado na análise à Fadiga da ponte Tres Cantos encontra-se resumida nos pontos seguintes,

- 1. Definição do ponto crítico de estudo, neste caso secção de meio vão ($x=22,75\text{m}$).
- 2. Simulação da passagem dos Modelos de Carga FLM3 e FLM4 no modelo numérico.
- 3. Obtenção da amplitude tensional máxima na secção de controlo.
- 4. Determinação do número de ciclos resistentes, assumindo previamente a categoria de pormenor da ligação em estudo.
- 5. Cálculo do dano provocado pelas oscilações tensionais originadas pelo veículo FLM3 e por cada um dos cinco veículos tipo constituintes do modelo de carga FLM4.
- 6. Obtenção do dano total provocado pelas diferentes oscilações tensionais de amplitude constante, resultantes de cada um dos veículos, mediante o critério de Palmgren – Miner.

Fixando como ponto crítico aquele que se encontra sujeito a maior variação de momentos fletores, e portanto, maior oscilação tensional, simulou-se no modelo numérico a passagem do veículo de carga FLM3 e cada um dos veículos tipo do modelo FLM4, por forma a obter a variação de esforços provocada por cada um destes veículos. Note-se que a modelação da passagem dos veículos de Fadiga foi efetuada de acordo com os critérios de modelação de carga já referidos em 5.2.1 para a tipologia de pontes em caixão, correspondendo à aplicação da resultante da carga vertical assim como do momento torsor gerado pela excentricidade no eixo longitudinal da viga modelada.

Na Figura 5.32 encontra-se um gráfico tipo da variação do momento fletor em função da posição do eixo frontal do veículo FLM3.

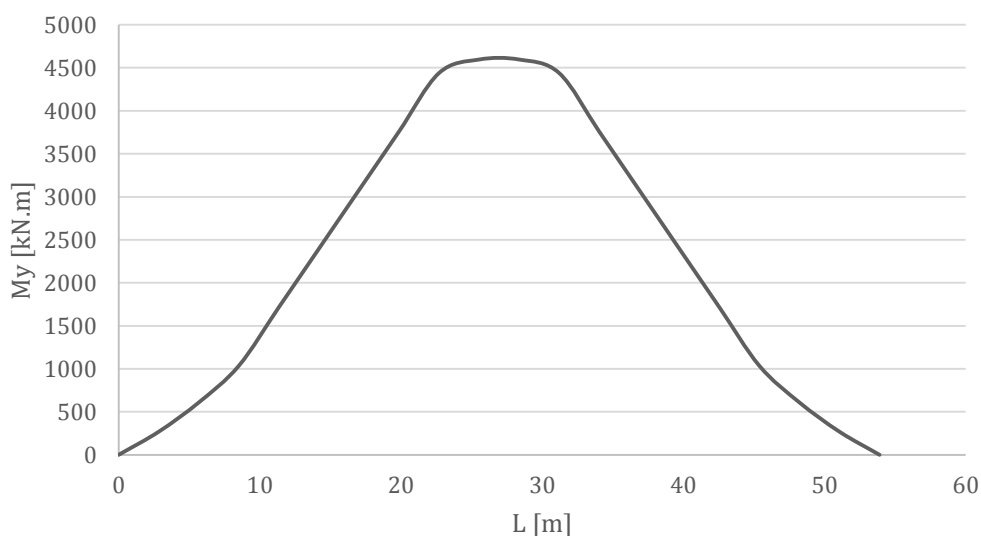


Figura 5.32 – Histórico de momentos fletores na secção de abcissa igual a 25,75 metros da ponte Tres Cantos devido à atuação do veículo FLM3

Conhecendo a variação de momento fletor provocada pelos modelos de carga, a oscilação total é obtida através da expressão (5.14),

$$\Delta M = M_{MAX} - M_{MIN} \quad (5.14)$$

Aplicando a equação (5.14) para cada uma das oscilações obtêm-se os resultados presentes na Tabela 5.17,

Tabela 5.17 – Oscilação de momentos fletores provocada por cada veículo na secção de controlo

Secção de Meio-Vão	
L = 45,5m	
$\Delta M_V[\text{FLM3}]$	4596 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-A})]$	2170 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-B})]$	3292 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-C})]$	4679 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-D})]$	3686 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-E})]$	4173 kN.m

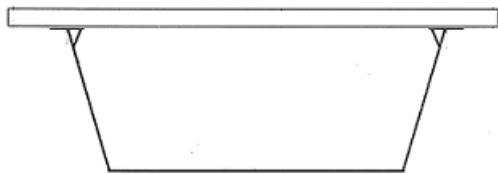
Sendo conhecida a oscilação em termos de esforços na secção de controlo, procede-se ao cálculo das tensões normais na fibra pretendida, neste caso na fibra localizada ao nível da ligação soldada da chapa de fundo do caixão. As tensões normais são obtidas mediante a fórmula clássica de Resistência de materiais dada por,

$$\Delta \sigma = \frac{\Delta M}{I_y} \times y_{fibra} \quad (5.15)$$

As propriedades mecânicas seccionais foram obtidas aquando do reajuste seccional efetuado em 5.4, encontrando-se sumarizadas na Tabela 5.18,

Tabela 5.18 – Propriedades mecânicas da secção redimensionada

Propriedades Mecânicas			
Secção Meio-Vão – x=25,75m	A [cm ²]	Y _G [cm]	I _g [cm ⁴]
Secção Mista	5510,66	57,24	30539629,20

	Y _T [cm]
	186,5

Pelo facto de a secção de controlo se encontrar na zona de flexão máxima positiva, as propriedades mecânicas usadas para o respetivo cálculo de tensões correspondem à secção mista, uma vez que a laje se encontra totalmente comprimida. Assim, os valores do intervalo de tensões normais resultante de cada um dos modelos de carga encontram-se resumidos na Tabela 5.19,

Tabela 5.19 – Intervalo de tensão provocado pelo veículo FLM3 e veículos pesados-tipo do modelo FLM4

Secção de Meio-Vão	
X = 22,75 m	
$\Delta\sigma[\text{FLM3}]$	19,45 MPa
$\Delta\sigma[\text{FLM4-a)]}$	9,19 MPa
$\Delta\sigma[\text{FLM4-b)]}$	13,93 MPa
$\Delta\sigma[\text{FLM4-c)]}$	19,80 MPa
$\Delta\sigma[\text{FLM4-d)]}$	15,60 MPa
$\Delta\sigma[\text{FLM4-e)]}$	17,66 MPa

Após a obtenção de cada intervalo de tensão de amplitude constante, procede-se ao cálculo da previsão de ciclos resistentes através da curva S-N correspondente à categoria de pormenor 71. A Figura 5.33 representa a curva S-N genérica para tensões normais.

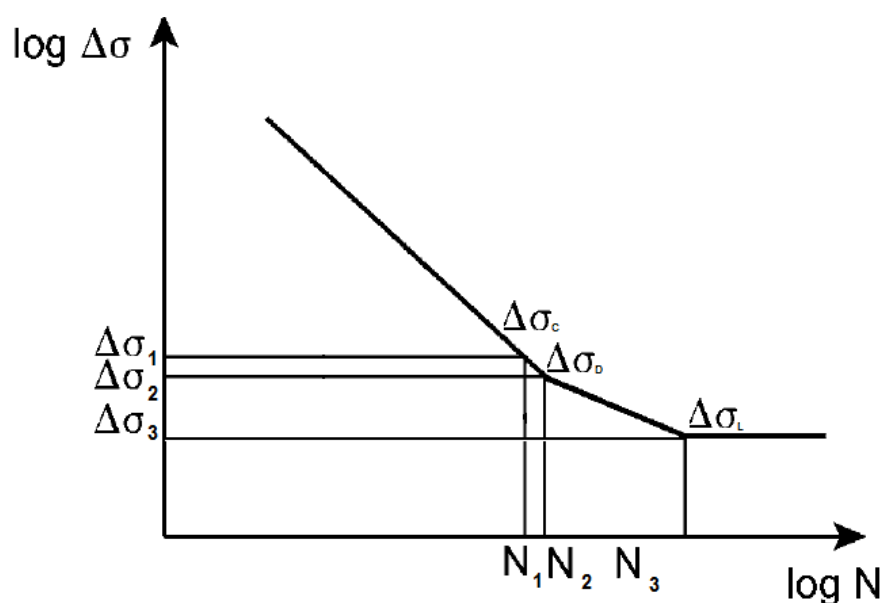


Figura 5.33 – Curva S-N genérica para tensões normais (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

Recorrendo à relação (2.7), é possível calcular o valor dos pontos marcados na Figura 5.33 por $\Delta\sigma_D$ e $\Delta\sigma_L$ correspondentes à categoria 71 ou seja conhecendo $\Delta\sigma_C$. Estes pontos característicos podem ser obtidos através da seguinte transformação matemática dada por (5.16) e (5.17), recorrendo às equações apresentadas em 2.4.

$$\Delta\sigma_D^3 \cdot 5 \cdot 10^6 = \left(\frac{\Delta\sigma_C}{1,35}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 \rightarrow \Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_C}{1,35}\right) = 0,7368 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_C}{1,35}\right) \quad (5.16)$$

e

$$\Delta\sigma_L^5 \cdot 100 \cdot 10^6 = \Delta\sigma_D^5 \cdot 5 \cdot 10^6 \rightarrow \Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \cdot \Delta\sigma_D = 0,5493 \cdot \Delta\sigma_D = 0,4047 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_C}{1,35}\right) \quad (5.17)$$

Posto isto, assumindo a categoria de pormenor de 71, de acordo com o pormenor 5 da Tabela 8.5 da EN1993-1-9, procede-se ao cálculo do número de ciclos resistentes associado a cada uma das oscilações de tensão da Tabela 5.19, sendo este valor calculado de acordo com o tramo da curva S-N onde se encontra a oscilação tensional, ou seja,

Se $\Delta\sigma_{FLM} \geq \Delta\sigma_D$

$$N_R = \frac{\left(\frac{\Delta\sigma_C}{1,35}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6}{\Delta\sigma_{FLM}^3} \quad (5.18)$$

Se $\Delta\sigma_D \leq \Delta\sigma_{FLM} \leq \Delta\sigma_L$

$$N_R = \frac{\Delta\sigma_D^5 \cdot 5 \cdot 10^6}{\Delta\sigma_{FLM}^5} \quad (5.19)$$

Se $\Delta\sigma_{FLM} \leq \Delta\sigma_L$

$$N_R \cong \infty \quad (5.20)$$

Aplicando as fórmulas (5.16) e (5.17),

$$\Delta\sigma_C = 71 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_D = 0,7368 \cdot \left(\frac{71}{1,35}\right) = 38,75 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_L = 0,5493 \times 38,75 = 21,28 \text{ MPa}$$

Exemplificando para o veículo de carga FLM3,

$$\Delta\sigma_{FLM3} = 19,45 \text{ MPa} < 21,28 \text{ MPa} \rightarrow N_R \cong \infty$$

E, sabendo que N_s é o número de veículos pesados que passaram na ponte ao longo de toda a sua vida, dado pela equação (5.21) considerando as diferentes IMDs preconizadas pelo Eurocódigo 1 Parte 2 (Tabela 4.1),

$$N_S = IMD_{EC1-2} \times \text{Vida Útil} \quad (5.21)$$

E tendo em conta que o dano é dado por (3.1),

$$D = \frac{N_S}{N_R} = \frac{(2 \cdot 10^6 \times 100)}{\infty} = 0$$

Conclui-se que o dano obtido para o intervalo de tensão provocado pelo veículo FLM3, assumindo uma intensidade de tráfego de 2 milhões de veículos pesados de 48 toneladas ao ano, é inexistente. Este valor era expectável, uma vez que o valor da variação de tensão normal se encontra por baixo do Limite de Truncatura, limite abaixo do qual não ocorre dano por fadiga.

Para o caso do modelo FLM4, cada veículo tipo provocará uma parcela de dano, sendo o dano total dado pela regra de dano linear formulada por Palmgren-Miner, ou seja desenvolvendo a expressão (3.2) chega-se à equação (5.22),

$$D = \frac{N_{S1}}{N_{R1}} + \frac{N_{S2}}{N_{R2}} + \frac{N_{S3}}{N_{R3}} + \frac{N_{S4}}{N_{R4}} + \frac{N_{S5}}{N_{R5}} \quad (5.22)$$

Repetindo o procedimento para as restantes oscilações de tensão, diferentes Intensidades Médias Diárias e para as diferentes distribuições dos veículos pesados constituintes do modelo de Fadiga FLM4, sistematizaram-se os resultados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 –Dano na ligação transversal de chapas de fundo assumindo categoria de pormenor de 71

Veículo de Fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego		
		45,5 m		
		TL	MD	LD
FLM3	2	0		
FLM4		0	0	0
FLM3	0,5	0		
FLM4		0	0	0
FLM3	0,125	0		
FLM4		0	0	0
FLM3	0,05	0		
FLM4		0	0	0

Como se pode verificar da análise dos resultados da Tabela 5.20, o dano obtido para a ligação transversal da chapa de fundo, assumindo categoria de pormenor de 71, é inexistente, mesmo para as piores condições de tráfego de 2 milhões de veículos pesados por ano e configuração de tráfego de longa distância dos veículos pesados do modelo FLM4.

Por forma a determinar qual a categoria de pormenor mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado, recorreu-se ao procedimento exposto anteriormente de forma iterativa até se atingir o dano unitário. O dano unitário é obtido iterativamente pela alteração sucessiva da categoria de pormenor ($\Delta\sigma_c$) tendo-se desenvolvido para o efeito uma folha de cálculo em Excel por forma a agilizar este cálculo. A Tabela 5.21 exemplifica uma das folhas de cálculo desenvolvidas.

Tabela 5.21 – Exemplo de cálculo de categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado

Vão [m]	VU[anos]	IMD [V/ano]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]		γ_{mf}	
45,5	100	2 000 000,00	65		1,35	
Veículo	% IMD	Total veículos	M [kN.m]	$\Delta\sigma$ [MPa]	N_R ($\times 10^6$)	Dano (σ)
FLM3						
480	100	200 000 000,00	4596,000	19,453	100000000	0,000
FLM4	LD					
200	20	40 000 000	2170	9,185	100000000	0,000
310	5	10 000 000	3292	13,933	100000000	0,000
490	50	100 000 000	4679	19,804	92,23	1,084
390	15	30 000 000	3686	15,601	100000000	0,000
450	10	20 000 000	4173	17,662	100000000	0,000
TOTAL	100	200 000 000				1,084

Posto isto sistematizam-se na Tabela 5.22 os resultados obtidos para as diferentes IMDs e configurações de veículos pesados do modelo FLM4.

Tabela 5.22 – Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado

Veículo de Fadiga	N_{obs} ($\cdot 10^6$ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego		
		45,5 m		
		TL	MD	LD
FLM3	2	65		
FLM4		48	60	66
FLM3	0,5	57		
FLM4		37	48	52
FLM3	0,125	43		
FLM4		27	37	40
FLM3	0,05	36		
FLM4		21	28	32

Note-se que os resultados apresentados na Tabela 5.22 5.22, constituem a categoria de pormenor necessária para obtenção de um dano unitário, pelo que, nas condições de intensidade de tráfego mais intenso e considerando que a maior parte deste tráfego é constituído por veículos de elevado peso, ou seja, o cenário de Longa Distância do FLM4, a categoria mínima exigida é de 66. Tendo em conta que a categoria de pormenor minimamente aceitável para a ligação transversal da chapa de fundo é de 71, conclui-se que o dimensionamento da secção transversal em Estado Limite Último (excluindo a fadiga) não é condicionado pelas exigências de fadiga, verificando-se assim a segurança da secção sob a ótica do Método do Dano Acumulado.

5.5.3.2 Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2

Tal como já referido, o Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2 consiste na transformação do intervalo de tensão de amplitude constante, num intervalo de tensão diretamente comparável com a categoria de pormenor em estudo. Esta calibração do intervalo de tensão é efetuada mediante a aplicação de coeficientes que têm em conta o comprimento do vão, o peso médio dos veículos circulantes em via lenta, assim como a sua frequência de passagem e vida útil esperada da estrutura.

Assim, a aplicação prática deste método passa pelo seguinte procedimento,

- 1. Definição do ponto crítico de estudo, neste caso secção de meio vão.
- 2. Simulação de passagem do modelo de carga FLM3 no modelo numérico.
- 3. Obtenção da amplitude tensional máxima na secção de controlo.
- 4. Obtenção dos coeficientes de calibração λ em função das características estruturais e de serviço da estrutura.
- 5. Verificação de segurança mediante a comparação do produto dos coeficientes λ_i pela oscilação tensional e a respetiva categoria de pormenor, minorada pelo coeficiente de risco máximo, γ_{Mf} , de 1,35.

Todos os pressupostos de obtenção de variação do momento fletor e cálculo de tensões normais já evidenciados aquando da exposição da aplicação do Método do Dano Acumulado se mantêm válidos. Assim, no âmbito da aplicação do Método Simplificado foram recuperadas as propriedades mecânicas da secção (Tabela 5.7) assim como o intervalo de tensão respeitante ao veículo FLM3 (Tabela 5.19).

Para que se verifique a segurança à Fadiga, do pormenor de ligação em estudo, sob a ótica do Método Simplificado presente na EN1993-2, é necessário, tal como visto em 4.4, que seja cumprida a condição da expressão (4.1). Tendo em conta as equações (4.2), (4.3) e (4.4) e sendo conhecido o intervalo de tensão induzido pelo veículo FLM3, segue-se a determinação dos coeficientes parciais e respetivo coeficiente de dano λ .

- Cálculo de λ_1 ,

De acordo com a EN1993-1-9 e tal como já exposto no Capítulo 4, λ_1 tem em conta o comprimento crítico de influência e pode ser obtido mediante a aplicação das expressões presentes nas Figuras 4.3 e 4.4 do Capítulo 4, para zonas de vão e apoio, respetivamente.

No presente caso, assim como nos seguintes, apenas se usará a equação respeitante à zona de centro de vão. Posto isto, recorrendo à expressão presente na Figura 4.3,

$$\lambda_1 = 2,55 - \frac{L - 10}{70} = 2,55 - 0,70 \times \frac{45,5 - 10}{70} = 2,195$$

- Cálculo de λ_2 ,

O coeficiente λ_2 , tem em conta o peso médio dos veículos pesados circulantes e a frequência de passagem num ano de cada tipologia de veículo, ou seja de cada peso, e é calculado tal como indicado em 4.4 através da equação (4.5).

No âmbito do presente estudo, este coeficiente foi obtido considerando não só que todos os veículos seriam do tipo FLM3, considerando,

$$Q_{m1} = 480 \text{ kN}$$

e,

$$N_{obs} = 2.10^6 \text{ ou } 0,5.10^6 \text{ ou } 0,125.10^6 \text{ ou } 0,05.10^6 \text{ veículos/ano}$$

Mas também, considerando a configuração de veículos pesados tipo do modelo FLM4. No caso do modelo FLM3, este pressupõe que todo o tráfego pesado que circula é de 480kN, já o modelo de carga FLM4 pressupõe várias distribuições percentuais dos seus veículos tipo em função da distância de percurso. Assim sendo, no caso do modelo FLM4, λ_2 foi calculado tendo em conta o peso de cada veículo pesado tipo e o respetiva percentagem de ciclos de passagem, em função da dimensão do percurso. Este reajuste é dado por (5.23),

$$\lambda_2 = \left(\frac{\sum_1^5 Q_{mFLM4-i}^5 \times N_{obsFLM4-i}}{Q_0^5 \times N_0} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (5.23)$$

Por exemplo, considerando que a totalidade dos veículos são do tipo FLM3, e que solicitam a estrutura com a máxima intensidade de tráfego, e recorrendo à expressão (4.5),

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \cdot \left(\frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{1/m} = \frac{480}{480} \cdot \left(\frac{2.10^6}{0,5.10^6} \right)^{1/5} = 1,3195$$

Por outro lado, considerando a distribuição de veículos FLM4 supondo a configuração de tráfego de longa distância, aplicando a equação (5.23),

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \left(\frac{\sum_1^5 Q_{mFLM4-i}^5 \cdot N_{obsFLM4-i}}{Q_0^5 \cdot N_0} \right)^{\frac{1}{5}} = \\ &= \left(\frac{(200^5 \times 400000 + 310^5 \times 100000 + 490^5 \times 1000000 + 390^5 \times 300000 + 450^5 \times 200000)}{480^5 \times 500000} \right)^{\frac{1}{5}} = \\ &= 1,224 \end{aligned}$$

- Cálculo de λ_3

O coeficiente λ_3 , tem, como já referido na respetiva secção, o propósito de ter em conta o efeito da vida útil esperada. No caso das pontes, a vida útil esperada é de 100 anos, e recorrendo à expressão (4.7), o valor resulta unitário.

- Cálculo de λ_4

Este coeficiente pretende avaliar a influência da passagem de veículos pesados em mais do que uma via lenta de circulação. No âmbito deste projeto este coeficiente foi considerado unitário.

- Cálculo de λ_{max}

O coeficiente λ_{max} tem como propósito limitar o produto dos quatro coeficientes definidos e calculados anteriormente, e tal como o coeficiente λ_1 , este depende do comprimento crítico de influência. As fórmulas matemáticas que permitem calcular este coeficiente encontram-se nas Figuras 4.5 e 4.6 para zonas de vão e zonas de apoio, respetivamente. À semelhança do coeficiente λ_1 , também o coeficiente λ_{max} será apenas calculado para a zona de vão (Figura 4.5), uma vez que se pretende analisar a secção de flexão máxima positiva. Assim, uma vez que $L > 30m$,

$$\lambda_{max} = 2,0$$

Estando agora todos os coeficientes definidos e calculados, o coeficiente de dano total é calculado recorrendo à equação (4.4),

$$\lambda = \min(2,0; 2,195 \times 1,3195 \times 1,0 \times 1,0) = 2,0$$

Ou, para a distribuição do modelo FLM4,

$$\lambda = \min(2,0; 2,195 \times 1,224 \times 1,0 \times 1,0) = 2,0$$

Finalmente, tendo em conta que a tensão equivalente é calculada através da equação (4.2),

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_k) = 1,0 \times 2,0 \times 19,45 = 38,90 \text{ MPa}$$

Assumindo que a categoria de pormenor da ligação em causa é 71,

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \leftrightarrow 38,90 \leq \frac{71}{1,35} \leftrightarrow 38,90 \leq 52,6$$

Encontra-se assim cumprido o requisito de verificação de segurança à Fadiga para esta ligação, através do Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2. Por outro lado se pretender saber qual a categoria mínima para que seja cumprida a segurança, procede-se à reorganização da equação (4.1), resultando,

$$\frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \geq \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leftrightarrow \Delta\sigma_C \geq 38,90 \times 1,35 \leftrightarrow \Delta\sigma_C \geq 52,52 \text{ MPa}$$

Repetindo o processo para todas as intensidades de tráfego da Tabela 4.1, e para cada uma das configurações de tráfego do modelo FLM4 (Tabela 4.4), obtêm-se os coeficientes totais de dano para cada caso, tal como se apresenta na Tabela 5.23,

Tabela 5.23 – Coeficientes de dano para o veículo FLM3 e FLM4 em função da Intensidade de tráfego

Veículo de Fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego		
		Vão de 45,5 m		
		TL	MD	LD
λ_{FLM3}	2	2		
λ_{FLM4}		1,911	2	2
λ_{FLM3}	0,5	2		
λ_{FLM4}		1,448	1,861	2
λ_{FLM3}	0,125	1,663		
λ_{FLM4}		1,098	1,410	1,544
λ_{FLM3}	0,05	1,385		
λ_{FLM4}		0,914	1,174	1,285

Tal como já efetuado anteriormente, conhecendo os coeficientes totais de dano e a intervalo de tensão provocada pelo veículo de Fadiga FLM3, assim como a categoria de pormenor e o respetivo coeficiente parcial de segurança, procede-se à verificação de segurança de acordo com o Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2, encontrando-se resumidos na Tabela 5.24 os resultados obtidos através da multiplicação dos coeficientes de dano (Tabela 5.23) pelo intervalo de tensão gerado pela passagem do veículo FLM3.

Tabela 5.24 – Tensão de dano equivalente em função das diferentes intensidades de tráfego

Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego		
		Vão 45, m		
		TL	MD	LD
FLM3	2	38,9		
FLM4		37,2	38,9	38,9
FLM3	0,5	38,9		
FLM4		28,2	36,2	38,9
FLM3	0,125	32,3		
FLM4		21,4	27,4	30,0
FLM3	0,05	26,9		
FLM4		17,8	22,8	25,0

Como se pode observar pelos resultados da Tabela 5.24, a segurança é cumprida para todos os casos de intensidade de tráfego e configuração do veículo FLM4 com uma categoria de pormenor de 71, tal como era já expectável pelo exemplo detalhado anteriormente. Procedendo agora de forma inversa, a categoria mínima necessária obtém-se reorganizando a equação (4.1), já usada para o exemplo explicitado. A categoria mínima para cada um dos casos de intensidade de tráfego, assim como configuração de veículos pesados do modelo FLM4 encontram-se na Tabela 5.25.

Tabela 5.25 – Categoria mínima segundo o Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2

Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão (m) e cenário de tráfego		
	(·10 ⁶ vp/ano)	45,5 m		
		TL	MD	LD
FLM3	2	53		
FLM4		50	53	53
FLM3	0,5	53		
FLM4		38	49	53
FLM3	0,125	44		
FLM4		29	37	41
FLM3	0,05	36		
FLM4		24	31	34

Como se pode observar através da análise da Tabela 5.25, e tal como era expectável após o cálculo efetuado anteriormente, a segurança é cumprida para qualquer uma das intensidades e distribuição de tráfego para ambos de modelos de veículo de fadiga.

5.5.3.3 Análise comparativa e influência da variação do comprimento do vão

Tendo em conta o exposto anteriormente, será agora levada a cabo uma análise comparativa entre ambos os métodos de análise à Fadiga, para comprimentos de vão de 20, 30, 45,5 e 60 m. Desta forma, será não só avaliada a precisão, e grau do carácter conservativo, do Método Simplificado do EC3-2, mas serão também retiradas ilações acerca da influência da variação do comprimento do vão na análise à Fadiga. Usando o procedimento descrito em 5.4 para o reajuste das secções de acordo com as ações descritas na EN1991-2, encontram-se resumidas na Tabela 5.26 as características seccionais para os diferentes comprimentos de vão, e na Tabela 5.27 os valores dos esforços em ELU, e também os valores das oscilações de momento fletor resultantes da aplicação do modelo FLM3 e FLM4.

Tabela 5.26 – Características seccionais das secções de centro de vão para os diferentes comprimentos de vão

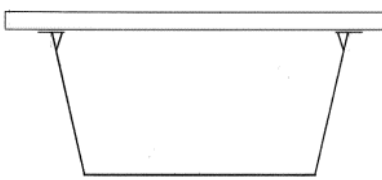
Pontes caixão Isostáticas								
Secção Real								
								
Características Seccionais	Secção de centro de vão							
	20 m		30 m		45,5 m		60 m	
	B[cm]	H[cm]	B[cm]	H[cm]	B[cm]	H[cm]	B[cm]	H[cm]
H_{Total} [cm]	100		120		190		250	
H_{Metal} [cm]	75		95		165		225	
Laje [cm]	1060	25	1060	25	1060	25	1060	25
$2 \times Plat. Sup.$	80	1,5	80	1,5	80	1,5	80	1,5
$2 \times Alma$ [cm]	2	71,5	2	90,5	2	160	2	219
Plat. Inf.[cm]	350	2	350	3	350	3,5	350	4,5
$I_{Secção Mista}$ [cm ⁴]	4888263		9857855		30539629		65495580	
Y_G [cm]	26,82		36,21		57,24		83,72	

Tabela 5.27 – Esforços em ELU e oscilação de momento fletor em função do comprimento de vão

Veículo de Fadiga	ΔM -kN.m			
	Vão			
	20m	30m	45,5m	60m
M_d (ELU)	18020	36243	76827	127800
M_{max} LM1	6676	11637	21272	32428
ΔM (FLM3)	1572	2736	4596	6336
ΔM (FLM4a)	957	1436	2170	2857
ΔM (FLM4b)	1305	2056	3292	4415
ΔM (FLM4c)	1588	2794	4679	6465
ΔM (FLM4d)	1189	2168	3686	5105
ΔM (FLM4e)	1307	2438	4173	5779

Também em termos de análise à fadiga se resgataram os procedimentos de cálculo para cada um dos métodos exemplificados na secção anterior, sendo que os resultados em termos de categoria mínima para o Método do Dano Acumulado e categoria necessária para verificar a segurança de acordo com o Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2 se encontram resumidos nas Tabelas 5.28 e 5.29, respetivamente. Os resultados abrangem os diferentes comprimentos de vão assim como todas as intensidades de tráfego sugeridas na EN1991-2 (Tabela 4.1) e diferentes configurações de veículos pesados-tipo do FLM4.

Tabela 5.28 – Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado

Método do Dano Acumulado													
Veículo de fadiga	N_{obs} ($\cdot 10^6$ Vp/ano)	Vão (m) e cenário de tráfego											
		20 m			30 m			45,5 m			60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	77			75			65			53		
FLM4		56	70	78	56	70	77	48	60	66	39	49	54
FLM3	0,5	67			66			57			46		
FLM4		47	56	60	42	56	60	37	48	52	30	39	42
FLM3	0,125	51			50			43			35		
FLM4		35	43	47	32	42	46	27	37	40	22	30	32
FLM3	0,05	42			42			36			29		
FLM4		28	34	37	25	33	37	21	28	32	17	23	26

Tabela 5.29 – Categoria mínima de acordo com o Método Simplificado do EC3 – Parte 2

Método Simplificado EC3-2 (Com λ_{MAX})													
Veículo de fadiga	Nobs	Vão (m) e cenário de Tráfego											
	(-10 ⁶ Vp/ano)	20 m			30 m			45,5 m			60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2		<u>67</u>			<u>61</u>			<u>53</u>			<u>42</u>	
FLM4			<u>66</u>	<u>67</u>	<u>67</u>	61	<u>61</u>	<u>61</u>	50	<u>53</u>	<u>53</u>	<u>38</u>	<u>42</u>
FLM3	0,5		67			<u>61</u>			<u>53</u>			<u>42</u>	
FLM4			50	64	67	47	60	61	38	49	53	<u>29</u>	<u>37</u>
FLM3	0,125		57			54			44			<u>33</u>	
FLM4			38	49	53	36	46	50	29	37	41	22	<u>28</u>
FLM3	0,05		48			45			36			<u>27</u>	
FLM4			32	41	44	30	38	42	24	31	34	18	23

Através da análise das Tabelas 5.28 e 5.29, refere-se que sob a ótica do Método do Dano Acumulado, o modelo de Fadiga FLM3 parece reproduzir na perfeição o pior cenário de intensidade de tráfego e distribuição de veículos pesados-tipo do modelo FLM4, uma vez que a categoria mínima obtida para ambos os modelos nas condições de tráfego de longa distância são iguais ou muito próximas. Verifica-se ainda que à medida que se alivia a intensidade de veículos pesados do modelo FLM4 (Tráfego Local e Média Distância) a categoria diminui tornando-se o modelo FLM3 conservativo em relação a este.

Ainda através do Método do Dano Acumulado, pode observar-se que a categoria mínima diminui à medida que o comprimento do vão aumenta. Esta observação parece ser bastante plausível, uma vez que à medida que aumenta o comprimento do tabuleiro, o peso das cargas distribuídas em relação às cargas concentradas do modelo LM1 torna-se mais condicionante a nível de dimensionamento em Estado Limite Último (excluindo a fadiga), conduzindo a secções mais robustas e consequentemente menos sensíveis às oscilações de tensão provocadas pelos veículos de fadiga.

Analisando os resultados obtidos através o Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2, percebe-se que este conduz a categorias de pormenor bastante uniformes, tanto para o Modelo FLM3 como para as diferentes configurações de veículos pesados-tipo do modelo FLM4, no caso de intensidade máxima de tráfego de 2 milhões de veículos pesados por ano. O comportamento descendente em termos de categoria de pormenor mantém-se relativamente ao Método do Dano Acumulado pelas razões já mencionadas acima.

No entanto, percebe-se que a análise à fadiga através deste método não se encontra do lado da segurança para intensidades de tráfego e configuração de veículos pesados-tipo mais exigentes, pois sugere categorias inferiores às categorias obtidas através do Método do Dano Acumulado para as mesmas condições. Os casos que caem do lado da insegurança encontram-se a negrito na Tabela 5.29. Tal discrepância, deve-se ao facto de o método simplificado ser governado pelo coeficiente λ_{max} , cujo valor vai diminuindo à medida que o comprimento do vão de influência aumenta, à semelhança do

coeficiente λ_1 , limitando o produto dos coeficientes parciais de dano a 2, para comprimentos de influência superiores a 30 m. Este coeficiente parece no entanto, encontrar-se bem calibrado para vãos e intensidades de tráfego inferiores, obtendo-se resultados ligeiramente conservativos face ao Método do Dano Acumulado. Por forma a analisar o impacto deste coeficiente, efetuou-se uma análise livre da influência do mesmo, pelo que os resultados se apresentam na Tabela 5.30,

Tabela 5.30 – Categoria mínima de acordo com o Método Simplificado do EC3 – Parte 2 livre da influência do coeficiente limitativo λ_{\max}

Método Simplificado EC3-2 (Sem λ_{\max})													
Veículo de fadiga	Nobs ($\cdot 10^6$ Vp/ano)	Vão (m) e cenário de Tráfego											
		20			30			45,5			60		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	100			94			77			58		
FLM4		67	85	93	62	80	88	51	65	71	38	49	54
FLM3	0,5	76			72			58			44		
FLM4		50	65	71	47	60	66	38	49	53	29	37	41
FLM3	0,125	57			54			44			33		
FLM4		38	49	54	36	46	50	29	37	41	22	28	31
FLM3	0,05	48			45			36			28		
FLM4		32	41	44	30	38	42	24	31	34	18	24	26

Da análise da Tabela 5.30, depreende-se que de facto removendo o coeficiente limitante λ_{\max} , o método torna-se conservativo para quase todos os casos, em particular nos casos mais extremos, e comprimentos de vão mais curtos, exceto para comprimentos de vão de 60m. O facto de ainda existirem casos de insegurança relativamente ao Método do Dano Acumulado, deve-se ao fator parcial λ_1 , que por apresentar um comportamento descendente à medida que o vão de influência aumenta torna o método inseguro. Segundo, Freitas (2014), este valor não deveria variar, mas sim manter-se fixo e assumir o valor de 2,2 para qualquer comprimento de influência de secções de centro de vão. O valor de 2,2 coincide com o comprimento de influência de 45,5 m, pelo que como se pode observar, os resultados são conservadores na sua totalidade, sendo mais conservador para comprimentos inferiores, ou seja para valores de λ_1 superiores a 2,2.

No entanto, pelo facto do coeficiente λ_{\max} parecer reproduzir de forma muito aproximada os resultados obtidos através do Método do Dano Acumulado para o vão de 20 m e IMD de 0,5 milhões de veículos pesados por ano, procurou-se encontrar um melhor ajuste entre ambos os métodos efetuando-se um novo estudo, aplicando unicamente o coeficiente λ_{\max} , calibrando-o em função da intensidade de tráfego, passando o coeficiente de dano total λ a ser dado unicamente por λ_{\max} experimental. Este ajuste efetuou-se através da relação (5.24) ,

$$\lambda = \lambda_{\max \text{ experimental}} = \lambda_{\max} \times \left(\frac{N_{OBS}}{N_0} \right)^{1/5} \quad (5.24)$$

Os resultados obtidos através do Método do Dano Acumulado e da aplicação de λ_{\max} experimental ao intervalo de tensão provocado pelo veículo de fadiga FLM3 encontram-se na Tabela 5.31,

Tabela 5.31 – Comparação entre MDA e o M.S. do EC3 – Parte 2 usando o coeficiente λ_{\max} experimental

MDA vs M.S. (com λ_{\max} Experimental)									
Veículo de fadiga	N _{obs} ($\cdot 10^6$ Vp/ano)	Vão (m)							
		20		30		45,5		60	
		MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.
FLM3	2	77	88	75	80	65	69	53	56
FLM3	0,50	67	67	66	61	65	52	46	42
FLM3	0,125	51	51	50	46	43	40	35	32
FLM3	0,050	42	42	42	38	36	33	29	27

Analisando os resultados da Tabela 5.31, verifica-se que efetuando a transformação anteriormente mencionada, se obtém uma excelente aproximação entre os resultados do Método do Dano Acumulado e o Método Simplificado do EC3-2, no caso de comprimento de vão de 20m, e IMD inferior a 2 milhões de veículos pesados por ano. Para os restantes casos verifica-se um défice de cerca de 10% para as IMDs que não a máxima, explicando-se este défice pelo facto do coeficiente λ_{\max} ser constante, e igual a 2, para comprimentos de vão superiores a 30m, pelo que aplicando a sugestão apresentada em Freitas (2014), e fixando este valor em 2,2, tornaria todos os demais casos muito aproximados ao Método do Dano Acumulado. Face a estas conclusões, questiona-se o porquê da existência de um coeficiente limitativo λ_{\max} e não a existência de um coeficiente mínimo de dano λ_{\min} em que os resultados base obtidos a partir deste coeficiente, seriam muito próximos dos resultados obtidos através do Método do Dano Acumulado, conduzindo o produto dos quatro coeficientes de calibração a resultados mais conservativos tal como pretendido.

5.5.4. PONTES CAIXÃO CONTÍNUAS DE 3 VÃOS

Nesta secção será levada a cabo a verificação de segurança da ligação transversal da chapa de fundo de uma ponte caixão contínua de 3 vãos, com as mesmas características geométricas da Ponte Fornells, cuja descrição se encontra em 5.2.2. A secção transversal nas zonas de flexão máxima positiva de vão lateral e de vão central, serão reajustadas tendo em conta as exigências de ELS e ELU, excluindo a fadiga. Para além da verificação de segurança mencionada, será também executada, à semelhança das pontes caixão isostáticas, uma análise comparativa para quatro comprimentos de vão principal tipo, variando em cada um deles o comprimento do vão lateral, por forma a analisar o seu impacto, tanto nos esforços em ELU, como na análise à fadiga.

A análise à fadiga de Pontes caixão contínuas de 3 vãos centrar-se-á nas secções críticas de flexão positiva, pelas razões já mencionadas em 5.5, considerando-se à semelhança do caso da ponte Tres Cantos, uma categoria de pormenor de 71 para a ligação transversal da chapa de fundo, e que esta ocorre numa posição crítica, tal como esquematizado na Figura 5.34.

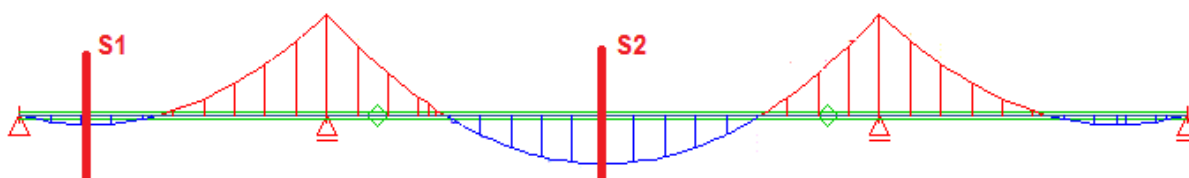


Figura 5.34 – Localização das secções transversais a analisar

5.5.4.1 Método do Dano Acumulado

Para levar a cabo a análise à fadiga segundo a ótica do Método do Dano Acumulado foram seguidos os mesmos critérios e procedimento de cálculo já exemplificado no caso da ponte Tres Cantos. Assim, recuperando o procedimento atrás mencionado e fazendo simular, no modelo de cálculo, a passagem dos veículos de Fadiga FLM3 e FLM4 de acordo com os critérios já referidos, são obtidos os valores de oscilação de momento fletor mediante a equação (5.14), tanto para a secção de flexão máxima positiva do vão lateral ($x = 10\text{m}$) como para a secção de flexão máxima positiva do vão central ($x = 67,5\text{m}$). As Figuras 5.35 e 5.36, representam a curva de oscilação de momento fletor para cada uma das secções, em função da posição do eixo frontal do veículo de fadiga solicitante, FLM3.

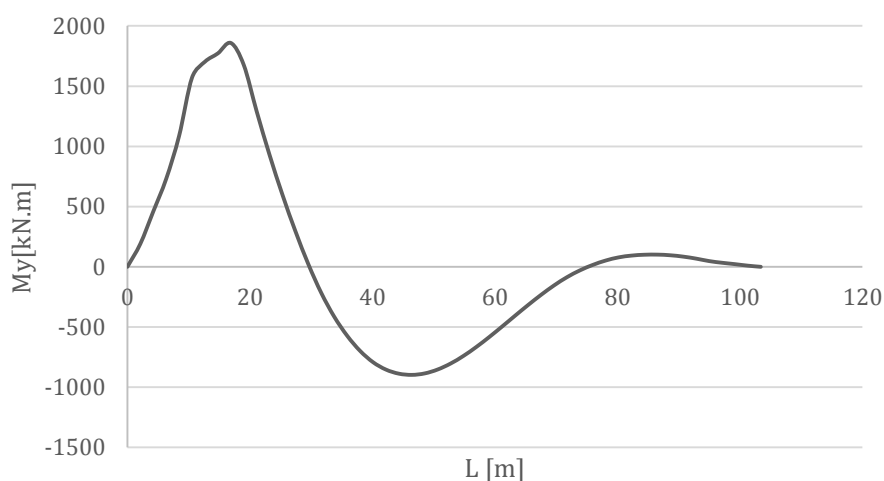


Figura 5.35 - Histórico de momentos fletores na secção de abscissa igual a 10 metros da ponte Fornells devido à atuação do veículo FLM3

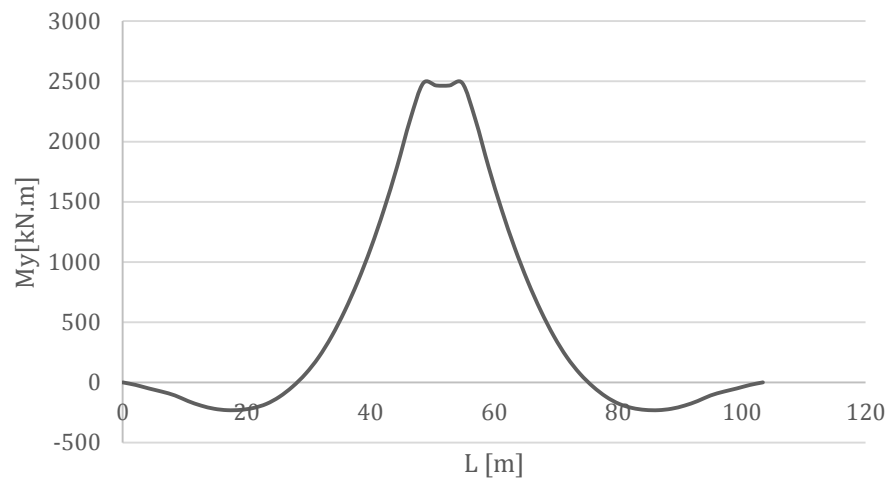


Figura 5.36 - Histórico de momentos fletores na secção de abcissa igual a 67,5 metros da ponte Fornells devido à atuação do veículo FLM3

Conhecendo o valor máximo e mínimo de momento fletor, resultante da passagem de cada veículo de fadiga, calcula-se, recorrendo à equação (5.14), o valor da oscilação total resultante. Os resultados da oscilação de momento fletor para cada uma das secções, encontram-se resumidos na Tabela 5.32.

Tabela 5.32 – Oscilação de momento fletor causado por cada veículo de fadiga

SECÇÃO DE VÃO LATERAL		SECÇÃO DE VÃO CENTRAL	
x = 10 m		x = 67,5m	
$\Delta M_V[\text{FLM3}]$	2756 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM3}]$	2716 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-A}]$	1382 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM4-A}]$	1390 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-B}]$	2057 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM4-B}]$	2021 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-C}]$	2786 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM4-C}]$	2781 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-D}]$	2130 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM4-D}]$	2151 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-E}]$	2238 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM4-E}]$	2423 kN.m

De forma análoga ao caso anterior, as oscilações de tensão são obtidas mediante a fórmula clássica de Resistência de Materiais (equação (5.15)), calculadas com as respectivas propriedades mecânicas seccionais, resultantes do reajuste efetuado em 5.4. As propriedades mecânicas da secção do vão lateral e vão central, encontram-se resumidas nas Tabelas 5.33 e 5.34.

Tabela 5.33 – Propriedades mecânicas da secção de vão lateral redimensionada

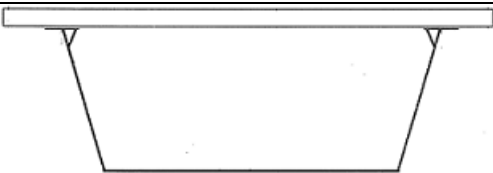
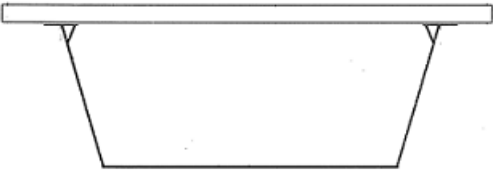
VÃO LATERAL – 25M			
PROPRIEDADES MECÂNICAS			
SECÇÃO MEIO-VÃO LATERAL X = 10 M	A [CM ²]	Y _G [CM]	I _G [CM ⁴]
SECÇÃO MISTA	6081,36	30,16	13640436,24
		Y _F [CM]	
		169	

Tabela 5.34 - Propriedades mecânicas da secção de vão central redimensionada

VÃO CENTRAL – 45M			
PROPRIEDADES MECÂNICAS			
SECÇÃO MEIO-VÃO CENTRAL X = 67,5 M	A [CM ²]	Y _G [CM]	I _G [CM ⁴]
SECÇÃO MISTA	6180,92	32,39	15525987,00
		Y _F [CM]	
		168,8	

Tomando os valores das propriedades mecânicas de secção mista, obtêm-se as oscilações de tensão de amplitude constante para cada um dos veículos de fadiga, e para cada uma das secções de controlo, encontrando-se os resultados sistematizados na Tabela 5.35.

Tabela 5.35 - Intervalo de tensões provocado pelos veículos FLM3 e FLM4

Secção de Meio-Vão Lateral		Secção de Meio-Vão Central	
X = 10m		X = 67,5m	
Δσ[FLM3]	28,05 MPa	Δσ[FLM3]	23,86 MPa
Δσ[FLM4-a)]	14,06 MPa	Δσ[FLM4-a)]	12,21 MPa
Δσ[FLM4-b)]	20,93 MPa	Δσ[FLM4-b)]	17,76 MPa
Δσ[FLM4-c)]	28,36 MPa	Δσ[FLM4-c)]	24,44 MPa
Δσ[FLM4-d)]	21,68 MPa	Δσ[FLM4-d)]	18,90 MPa
Δσ[FLM4-e)]	23,80 MPa	Δσ[FLM4-e)]	21,29 MPa

Conhecendo as oscilações de tensões, procede-se ao cálculo de fadiga através do Método do Dano Acumulado. Assim, tendo em conta que a fibra de controlo é novamente a ligação transversal da chapa de fundo, constituindo uma categoria de pormenor 71, os resultados em termos de dano para cada uma das secções de controlo apresentam-se na Tabela 5.36.

Tabela 5.36 – Dano na ligação transversal de chapas de fundo de acordo com o Método do Dano Acumulado

Veículo de Fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego					
		Vão central - 45 m			Vão lateral - 25 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	3,54			7,96		
FLM4		0,30	1,30	2,20	0,70	3,02	4,88
FLM3	0,5	0,89			1,99		
FLM4		0,08	0,32	0,55	0,18	0,76	1,22
FLM3	0,125	0,22			0,50		
FLM4		0,02	0,08	0,14	0,04	0,19	0,31
FLM3	0,05	0,09			0,20		
FLM4		0,01	0,03	0,06	0,02	0,08	0,12

Analisando os resultados presentes na Tabela 5.36, a segurança à fadiga da ligação transversal da chapa de fundo não é cumprida para a categoria de pormenor 71 nas condições e intensidades de tráfego mais exigentes, obtendo-se dano muito superior a 1, implicando uma vida útil inferior à esperada. Pode também verificar-se, que o modelo FLM3 é bastante conservador em todos os casos analisados, tal como era expectável, pois constitui um modelo de veículo bastante pesado e concentrado. Denota-se também, que o vão lateral sofre mais comparativamente com o vão central, agravando-se esta discrepância à medida que as condições de solicitação se intensificam.

Do ponto de vista da categoria ótima, ou seja a categoria que conduz a um dano unitário, encontram-se sumarizados na Tabela 5.37 os resultados obtidos de forma iterativa para cada uma das secções em estudo.

Tabela 5.37 – Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado

Categoria mínima - Método do Dano Acumulado							
Veículo de Fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego					
		Vão central 45 m			Vão lateral 25 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	80			93		
FLM4		59	74	82	68	86	95
FLM3	0,5	70			82		
FLM4		45	59	64	52	68	73
FLM3	0,125	53			62		
FLM4		34	45	49	39	52	57
FLM3	0,05	44			52		
FLM4		27	35	39	31	40	45

Como se pode verificar pela análise da Tabela 5.37, e tal como se tinha concluído pela análise das tabelas anteriores, são necessárias categorias de pormenor superiores a 71 para que seja garantida uma vida útil de 100 anos, tanto no caso do vão lateral como do vão central. À semelhança da ponte Tres Cantos, refere-se que o modelo FLM3 parece estar calibrado para reproduzir as piores condições de tráfego e distribuição de veículos pesados do modelo FLM4, tornando-se este conservador em relação às distribuições de veículos menos intensas.

No entanto, é importante referir, que pelo facto de não se cumprir a segurança de acordo com as exigências do Eurocódigo para as intensidades mais elevadas, não significa que as pontes estudadas se encontram em perigo ou necessitem algum tipo de intervenção, uma vez que aquando do seu dimensionamento, foram cumpridos todos os requisitos presentes na norma Espanhola em vigor. Assim, conclui-se que para o presente caso, e assumindo que a estrutura seria dimensionada na presente data, seriam necessárias categorias de pormenor superiores, ou no caso de não ser possível obter categorias mais elevadas, reajustar estas secções por forma a torna-las mais robustas, reduzindo o impacto da oscilação de esforços provocada pelos veículos de Fadiga.

5.5.4.2 Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2

Mediante a abordagem do Método Simplificado procede-se de forma análoga ao exemplo exposto da ponte Tres Cantos, repetindo-se todo o procedimento e critérios de cálculo. Posto isto, a Tabela 5.38

Tabela 5.38 resume, a título de exemplo de cálculo numérico, os coeficientes de calibração assim como o coeficiente de dano total obtido para cada secção de controlo, assumindo:

- IMD de 50 000 veículos pesados por ano.
- Configuração dos veículos pesados-tipo de longa distância do modelo FLM4.

Tabela 5.38 – Coeficientes parciais de dano para IMD de 0,5 milhões de veículos por ano e tráfego de longa distância do veículo de fadiga FLM4

Método Simplificado EC3-2				
	Vão Lateral		Vão Central	
λ_1	2,4		2,2	
λ_2	λ_{2-FLM3}	λ_{2-FLM4}	λ_{2-FLM3}	λ_{2-FLM4}
	0,631	0,585	0,631	0,585
λ_3	1		1	
λ_4	1		1	
λ_{max}	2		2	
λ	1,514	1,405	1,388	1,288

Repetindo o cálculo dos coeficientes de calibração para as restantes IMDs e configurações de veículos pesados do veículo de fadiga FLM4 (tráfego local e média distância), obtêm-se os coeficientes totais de dano apresentados na Tabela 5.39.

Tabela 5.39 - Coeficientes de dano para o veículo FLM3 e FLM4 em função da Intensidade de tráfego

Veículo de Fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego					
		Vão central 45 m			Vão lateral 25 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
λ_{FLM3}	2	2			2		
λ_{FLM4}		1,915	2	2	2	2	2
λ_{FLM3}	0,5	2			2		
λ_{FLM4}		1,451	1,865	2	1,583	2	2
λ_{FLM3}	0,125	1,667			1,819		
λ_{FLM4}		1,100	1,414	1,547	1,200	1,542	1,688
λ_{FLM3}	0,05	1,388			1,514		
λ_{FLM4}		0,916	1,177	1,288	1,00	1,284	1,405

Conhecendo os coeficientes totais de dano para cada caso de intensidade e configuração de tráfego, procede-se à verificação de segurança através do produto do coeficiente de dano pelo intervalo de tensão provocado pelo veículo de Fadiga FLM3, conduzindo aos resultados da Tabela 5.40,

Tabela 5.40 - Tensão de dano equivalente em função das diferentes intensidades de tráfego

Veículo de Fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego					
		Vão central 45 m			Vão lateral 25 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	47,7			56,1		
FLM4		45,7	47,7	47,7	56,1	56,1	56,1
FLM3	0,5	47,7			56,1		
FLM4		34,6	44,5	47,7	44,4	56,1	56,1
FLM3	0,125	39,8			51,0		
FLM4		26,2	33,7	36,9	33,7	43,3	47,3
FLM3	0,05	33,1			42,5		
FLM4		21,9	28,1	30,7	28,1	36,0	39,4

Assumindo uma categoria de pormenor de 71, reduzida pelo respetivo coeficiente parcial de segurança, observa-se que a segurança não é cumprida (valores a vermelho e negrito) no vão lateral para as intensidades de tráfego mais exigentes. Recompilando os resultados em termos de categoria mínima necessária para verificar a segurança à fadiga, obtêm-se resultados sistematizados na Tabela 5.41,

Tabela 5.41 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2

Método Simplificado EC3-2 – Categoria Mínima							
Veículo de Fadiga	Vão e Cenário de Tráfego						
	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão central 45 m			Vão lateral 25 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	64			76		
FLM4		62	64	64	76	76	76
FLM3	0,5	64			76		
FLM4		47	60	64	60	76	76
FLM3	0,125	54			69		
FLM4		35	46	50	46	59	64
FLM3	0,05	45			57		
FLM4		30	38	42	38	49	53

Analisando os resultados da Tabela 5.41, observa-se que a segurança é cumprida em todos os cenários de intensidade e distribuição de tráfego, com uma categoria de pormenor de 71 para a secção de controlo do vão central. No entanto, o mesmo já não se verifica para o caso do vão lateral, sendo necessário categorias de pormenor de 76 nos cenários de solicitação mais exigente, tal como já era esperado pela análise dos resultados anteriores.

5.5.4.3 Análise comparativa e influência da variação do vão lateral face ao principal

A análise de sensibilidade à fadiga de pontes contínuas de 3 vãos pode ser levada a cabo segundo duas variáveis fundamentais, a primeira, a variação do comprimento do vão lateral face ao vão central, e a segunda, a variação do comprimento do vão central. A análise comparativa executada nesta secção, centra-se em quatro comprimentos tipos de vão central, 30, 45, 60 e 75m e quatro comprimentos de vão lateral para cada um dos anteriores, variando estes comprimentos dentro das proporções usuais, no âmbito de projeto deste tipo de estruturas, de 60% a 100% do comprimento do vão central.

Por forma a salvaguardar a facilidade de leitura do documento, apenas se apresentarão na presente secção os comentários e conclusões resultantes da análise crítica dos resultados obtidos encontrando-se toda a informação relativa ao estudo efetuado resumida sob a forma de tabelas no Anexo A.

As secções transversais para os diferentes comprimentos de vão central foram reajustadas relativamente à secção de projeto original, de acordo com os critérios e procedimento mencionado em 5.4.2, encontrando-se no Anexo A (Tabelas A.1.8, A.1.15, A.1.22 e A.1.29) as principais características e propriedades mecânicas, assim como as oscilações de momentos fletores para cada um dos modelos FLM3 e FLM4, bem como os esforços em ELU para cada caso estudado (Tabelas A.1.7, A.1.14, A.1.21 e A.1.28).

Repetindo os procedimentos já detalhados para cada uma das metodologias de análise à Fadiga, apresenta-se também no Anexo A compilação de resultados em termos de categoria mínima, no caso do Método do Dano Acumulado (Tabelas A.1.9, A.1.16, A.1.23 e A.1.30), e no caso do Método Simplificado do EC3-2 a categoria mínima para cumprir a segurança (Tabelas A.1.10, A.1.17, A.1.24 e A.1.31), para cada um dos vãos laterais em função do comprimento do vão central.

Analisando os resultados obtidos através do Método do Dano acumulado, refere-se que, tanto para a secção de vão lateral, como para a secção de vão central, e à semelhança das pontes caixão isostáticas, o modelo de carga FLM3 parece reproduzir as condições de tráfego mais intensas em todos os casos estudados, ou seja, para uma IMD de dois milhões de veículos pesados por ano os resultados obtidos para o modelo FLM3 são muito próximos dos resultados obtidos para a configuração de veículos pesados-tipo de longa distância do modelo de carga FLM4, sendo conservativo para as demais configurações. Denota-se também o facto do vão lateral requerer categorias superiores ao vão central em todas as variantes analisadas, agravando-se esta tendência à medida que as proporções se aproximam da unidade.

Refere-se no entanto, que no caso do vão principal de 30 m, tanto o vão lateral como o vão principal parecem experimentar uma evolução crescente da categoria mínima segundo o MDA (Figuras A.1.5, A.1.6), tendência esta que não se verifica para os demais comprimentos tipo de vão principal. Nos restantes casos de comprimentos de vão principal, observa-se na secção de vão lateral uma tendência crescente da categoria de pormenor, seguida de uma quebra e posterior inversão da mesma a partir comprimentos mais significativos. Esta lei de variação pode ser explicada pelo facto de ser necessário, para comprimentos de vão lateral mais elevados, proceder a alterações seccionais que conduzem a secções mais robustas e consequentemente menos sensíveis aos efeitos dos veículos de fadiga. No caso da secção de controlo de vão central, verifica-se para todos os casos de comprimento estudados o mesmo comportamento ascendente, à medida que o comprimento do vão lateral aumenta, pois ao contrário da secção de vão lateral, o dimensionamento estrito em Estado Limite Último (excluindo a fadiga), conduz a secções cada vez menos robustas, tornando-as mais sensíveis ao impacto dos veículos FLM3 e 4.

Para além do referido, é importante recordar que a categoria de pormenor máxima possível para a ligação transversal da chapa de fundo é de 112, categoria esta superada em grande parte dos casos, particularmente quando o vão lateral atinge 100% do comprimento do vão principal, e para as intensidades de tráfego mais elevadas, tanto para o modelo de carga FLM3 como FLM4. Assim, conclui-se que para os casos em que não é possível obter categorias de pormenor superiores às exigidas, o dimensionamento da secção transversal vê-se condicionado pela Fadiga, sendo necessário obter secções mais robustas, por forma a reduzir o impacto das oscilações de tensões.

Sob a ótica do Método Simplificado do EC3-2, pode observar-se que tal como no caso do Método do Dano Acumulado, a categoria mínima necessária para que seja garantida a segurança, assume um comportamento similar, variando de acordo com o aumento do comprimento do vão lateral, verificando-se novamente na secção de vão lateral uma tendência ascendente seguida de uma quebra e inversão da mesma, para comprimentos superiores, exceto no caso do vão principal de 30 m, em que se verifica uma variação crescente, analogamente ao sucedido em todas as secções de vão central. Este comportamento era expectável uma vez que o propósito do Método Simplificado é reproduzir de forma conservativa os resultados do Método do Dano Acumulado.

Apesar do que fora referido anteriormente, acerca do propósito conservativo deste método, e analogamente ao caso das pontes em caixão isostáticas, o Método Simplificado revela-se não conservativo para as intensidades de tráfego mais exigentes, comportamento este explicado pelo facto do método ser governado pelo coeficiente limitante de dano λ_{\max} , impedindo que o produto dos 4 coeficientes parciais de dano conduza a valores superiores a 2, para comprimentos de vão de influência superiores a 30m. No entanto, este coeficiente parece estar bem calibrado para intensidades de tráfego menos intensas, e comprimentos de influência mais curtos. À semelhança do caso da ponte em caixão isostática, também neste caso se efetuou uma análise livre da influência deste coeficiente limitativo, por forma a avaliar o seu impacto nos resultados, encontrando-se nas Tabelas A.1.12, A.1.19, A.1.26 e A.1.33 os resultados obtidos.

Analisando as tabelas mencionadas, refere-se que as conclusões vão de encontro ao caso de Tres Cantos, ou seja removendo o coeficiente limitativo de dano λ_{\max} , os resultados obtidos através do Método Simplificado são conservativos para todas as IMDs, em particular nos casos mais extremos, veículos de Fadiga e comprimentos de vão até 45m revelando-se não conservativo e insuficiente para comprimentos em que o coeficiente λ_1 é inferior a 2,2, tal como se pode observar nos casos de 60m e 75m. Pelo facto do coeficiente λ_{\max} parecer encontrar-se bem calibrado para volumes de tráfego próximos dos 500 000 veículos pesados por ano, recalcularam-se as categorias mínimas usando apenas este coeficiente ou seja usando para o valor de λ o valor obtido através de λ_{\max} experimental, à semelhança da análise comparativa das pontes caixão isostáticas, mas corrigido mediante a intensidade de tráfego atuante, através da equação (5.23).

Face aos resultados obtidos (Tabelas A.1.13, A.1.20, A.1.27 e A.1.34), verifica-se uma excelente aproximação entre as categorias obtidas através do Método do Dano Acumulado e o Método Simplificado para comprimentos de vão menos importantes, usando apenas o coeficiente λ_{\max} corrigido, denotando-se o facto de os resultados serem mais próximos quando o valor de λ_{\max} original se aproxima de 2,2. Nos demais casos estudados, parece existir novamente uma insuficiência de cerca de 10% quando este coeficiente sem correção se fixa no valor igual a 2, sendo esta discrepância resolvida fixando este coeficiente em 2,2 para todos os casos à semelhança das conclusões apresentadas para λ_1 em Freitas (2014).

5.5.5. PONTES BI-VIGA CONTÍNUAS DE 3 VÃOS

Por constituir uma tipologia de ponte frequentemente utilizada nas condições e gamas de vãos estudados, e por forma a cobrir a maioria dos casos típicos de soluções de pontes mistas rodoviárias, procedeu-se de forma análoga à secção anterior, executando-se não só numa primeira instância a análise à Fadiga da ligação transversal da chapa de fundo de uma ponte bi-viga já existente, redimensionada de acordo com as condições normativas presente no Eurocódigo, mas também toda a análise comparativa já levada a cabo no caso das pontes caixão isostáticas e contínuas de três vãos, para comprimentos de vão central tipo de 30, 45, 60 e 75m, variando em cada um deles o comprimento do vão lateral dentro das proporções usuais de 60% a 100% do comprimento do vão principal.

Pelas razões já evidenciadas nos casos anteriores, também neste caso se analisarão à Fadiga apenas as secções de flexão máxima positiva, tanto no vão lateral como no vão central, assumindo que o pormenor de ligação transversal soldada entre chapas de fundo de cada viga metálica ocorre precisamente neste ponto de oscilação de esforço máxima, Figura 5.34.

Pelo facto de constituir uma ponte bi-viga, as ações correspondentes aos veículos de Fadiga FLM3 e FLM4, foram modeladas de acordo com que o que já fora referido em 5.2.1, obtendo-se a reação em cada viga decorrente da excentricidade dos veículos, sendo esta reação aplicada posteriormente com sinal invertido no modelo de cálculo desenvolvido em *Sofistik*. A Figura 5.37 ilustra a título de exemplo, a modelação das ações correspondes ao veículo FLM3.

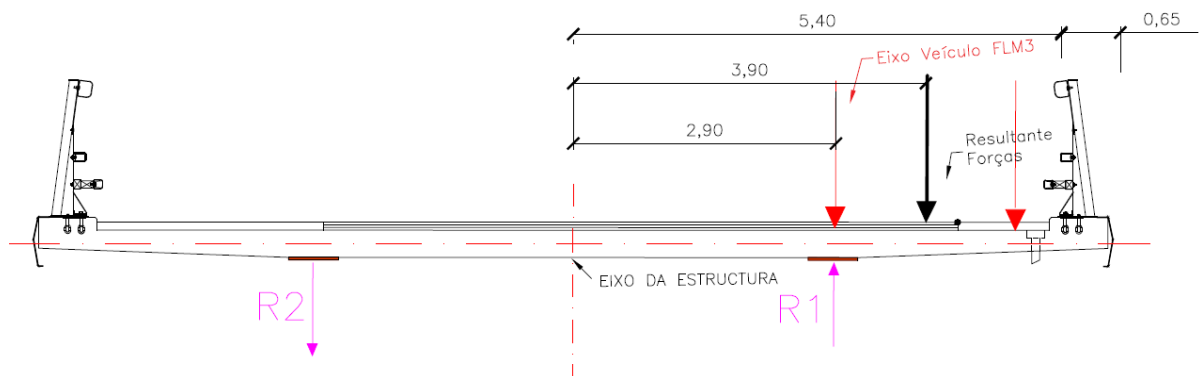


Figura 5.37 – Binário de reação numa secção bi-viga mediante o carregamento excêntrico do veículo FLM3

A reação R1 e R2 são então obtidas estaticamente,

$$R_{1-FLM3} = \frac{6,8 \times 120}{5,8} = 140,7 \text{ kN (}\uparrow\text{)}$$

$$R_{2-FLM3} = -(140,7 - 120) = -20,7 \text{ kN (}\downarrow\text{)}$$

As reações calculadas são aplicadas no modelo com sinal contrário por forma a simular a passagem de cada veículo de carga, tal como se pode observar na Figura 5.19.

Fixando como secção crítica a secção de flexão máxima positiva do vão lateral ($x = 15\text{m}$) e do vão central ($x = 70\text{m}$) obtém-se a variação de momentos fletores em função da posição do eixo frontal do veículo de fadiga FLM3, tal como se pode observar nas Figuras 5.38 e 5.39,

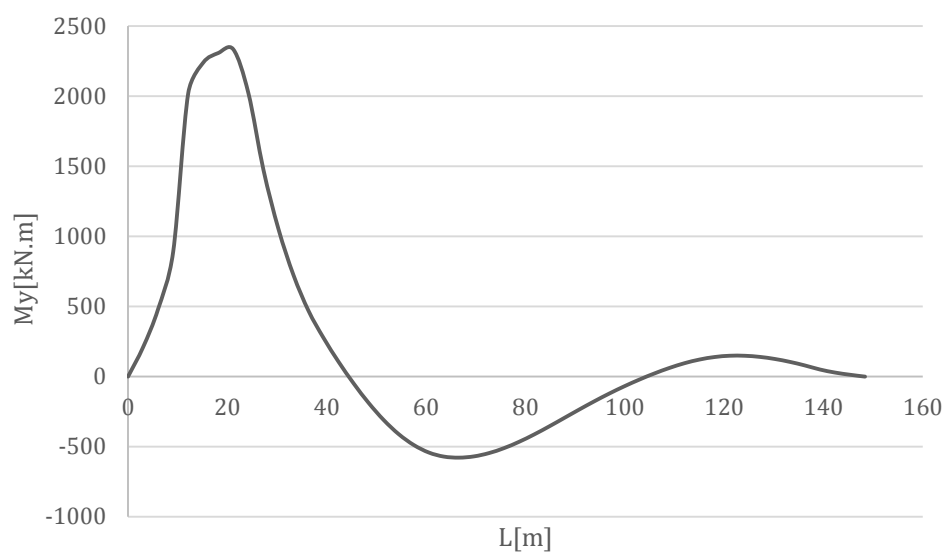


Figura 5.38 - Histórico de momentos fletores na secção de abscissa igual a 15 metros da ponte Ute - Nueno devido à atuação do veículo FLM3

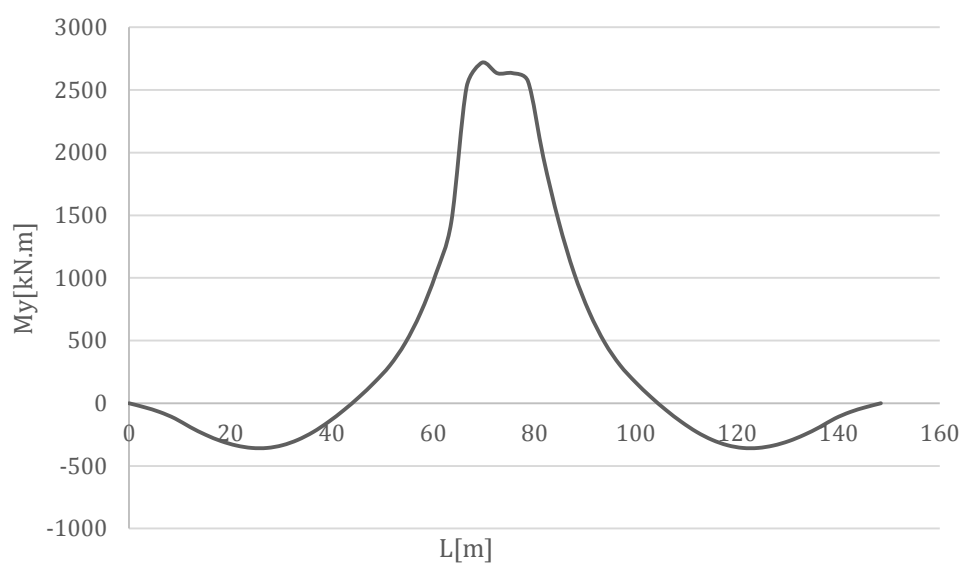


Figura 5.39 - Histórico de momentos fletores na secção de abscissa igual a 70 metros da ponte Ute - Nueno devido à atuação do veículo FLM3

5.5.5.1 Método do Dano Acumulado

Recuperando o procedimento de cálculo relativo ao Método do Dano Acumulado e obtendo a oscilação de momentos fletores mediante a equação (5.14), apresentam-se os resultados para cada um dos veículos de fadiga na Tabela 5.42,

Tabela 5.42 - Oscilação de momento fletor causado por cada veículo de fadiga

SECÇÃO DE VÃO LATERAL		SECÇÃO DE VÃO CENTRAL	
x = 15 m		x = 70 m	
$\Delta M_V[\text{FLM3}]$	2835 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM3}]$	3083 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-A}]$	1314 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM4-A}]$	1665 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-B}]$	2074 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM4-B}]$	2324 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-C}]$	2895 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM4-C}]$	3127 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-D}]$	2262 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM4-D}]$	2469 kN.m
$\Delta M_V[\text{FLM4-E}]$	2495 kN.m	$\Delta M_V[\text{FLM4-E}]$	2765 kN.m

Procedendo de forma análoga aos casos estudados anteriormente, o intervalo de tensão respectiva a cada um dos veículos simulado, é calculado mediante a fórmula clássica de Resistência de Materiais, pelo que as propriedades mecânicas de cada uma das secções de vão lateral e central, reajustadas segundo o procedimento exposto em 5.4, assim como os resultados das oscilações de tensões se encontram nas Tabelas 5.43 e 5.42, respetivamente.

Tabela 5.43 - Propriedades mecânicas da secção de vão central redimensionada

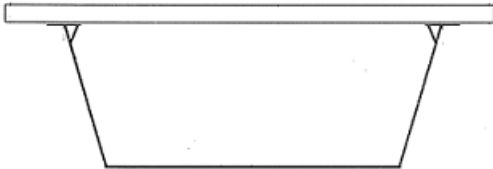
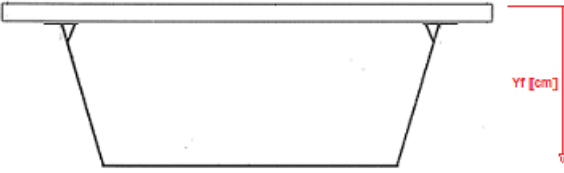
VÃO LATERAL – 40 m			
PROPRIEDADES MECÂNICAS			
SECÇÃO VÃO LATERAL X = 15 m	A [CM ²]	Y _G [CM]	I _G [CM ⁴]
SECÇÃO MISTA	3207,98	35,07	10198110
	Y _F [CM]		
	196,5		

Tabela 5.44 - Propriedades mecânicas da secção de vão lateral redimensionada

VÃO CENTRAL – 60 M			
PROPRIEDADES MECÂNICAS			
SECÇÃO VÃO CENTRAL X = 70 M	A [CM ²]	Y _G [CM]	I _G [CM ⁴]
SECÇÃO MISTA	3381,78	42,05	13832214
		Y _F [CM]	
		194,5	

Procedendo ao cálculo do intervalo de tensão ao nível da fibra de ligação transversal da chapa de fundo, recorrendo à equação (5.15), sumarizam-se na Tabela 5.45 os resultados obtidos

Tabela 5.45 - Intervalo de tensão causado por cada veículo de fadiga

Secção de Vão Lateral		Secção de Vão Central	
X = 15 m		X = 70 m	
$\Delta\sigma$ [FLM3]	44,88 MPa	$\Delta\sigma$ [FLM3]	33,97 MPa
$\Delta\sigma$ [FLM4-a)]	20,81 MPa	$\Delta\sigma$ [FLM4-a)]	18,35 MPa
$\Delta\sigma$ [FLM4-b)]	32,83 MPa	$\Delta\sigma$ [FLM4-b)]	25,62 MPa
$\Delta\sigma$ [FLM4-c)]	45,82 MPa	$\Delta\sigma$ [FLM4-c)]	34,46 MPa
$\Delta\sigma$ [FLM4-d)]	35,81 MPa	$\Delta\sigma$ [FLM4-d)]	27,21 MPa
$\Delta\sigma$ [FLM4-e)]	39,50 MPa	$\Delta\sigma$ [FLM4-e)]	30,47 MPa

Conhecendo o intervalo de tensão provocado por cada veículo de Fadiga, e analogamente ao caso da ponte Fornells, procede-se ao cálculo do dano provocado pelos modelos de carga assumindo uma categoria de Pormenor 71. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.46,

Tabela 5.46 - Dano na ligação transversal de chapas de fundo de acordo com o Método do Dano Acumulado

Veículo de Fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego					
		Vão central - 60 m			Vão lateral - 40 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2		20,72			62,13	
FLM4		2,31	8,80	13,60	7,65	27,74	42,22
FLM3	0,5		5,18			15,53	
FLM4		0,58	2,20	3,40	1,91	6,94	10,55
FLM3	0,125		1,30			3,88	
FLM4		0,14	0,55	0,85	0,48	1,73	2,64
FLM3	0,05		0,52			1,55	
FLM4		0,06	0,22	0,34	0,19	0,69	1,06

Analisando a Tabela 5.46, verifica-se que o dano em ambas as secções superam largamente o limite de dano unitário para todas as intensidades e distribuições de veículos, exceto para o caso de intensidade mais baixa no vão central em que se obtém um dano inferior à unidade. Assim, a ligação transversal da chapa de fundo de cada viga não cumpre o período de vida útil de 100 anos, sendo este até bastante mais reduzido do que o esperado, vaticinando assim a necessidade de usar categorias de pormenor superiores a 71.

É notável também o facto de à semelhança da ponte caixão contínua de 3 vãos, o vão lateral ser mais afetado pelo intervalo de tensão provocado pelos veículos de fadiga, assim como o facto do veículo FLM3 ser bastante mais conservador comparativamente com o veículo FLM4, ao pressupor que a totalidade do tráfego circulante possui uma massa de 48 toneladas, o que o torna bastante pesado e concentrado, tal como já se havia concluído no caso da ponte Fornells. Também neste caso se determinou a categoria ótima, ou seja a categoria que permite que a estrutura funcione na totalidade da sua vida útil, encontrando-se estes resultados presentes na Tabela 5.47,

Tabela 5.47 - Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado

Método do Dano Acumulado							
Veículo de Fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego					
		Vão central 60 m			Vão lateral 40 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	114			150		
FLM4		84	104	115	110	138	152
FLM3	0,5	99			131		
FLM4		64	84	91	84	110	120
FLM3	0,125	75			99		
FLM4		49	63	69	61	84	92
FLM3	0,05	63			83		
FLM4		39	50	55	47	65	73

Tal como era expectável, as categorias necessárias para garantir um dano unitário e assim uma vida útil igual à esperada, são superiores à categoria de pormenor 71 na grande maioria dos casos de intensidade de solicitação, salvo os casos de 50 e 125 mil veículos pesados por ano na secção de vão central, e apenas o primeiro no caso da secção de vão lateral. Também no presente caso se pode verificar a correta calibração do veículo FLM3 para reproduzir as piores condições de solicitação do veículo FLM4 para a intensidade máxima de circulação, obtendo-se categorias muito próximas entre os dois veículos, sendo o primeiro conservador para todas as demais configurações do segundo. Denota-se também, que a ordem de grandeza das categorias de pormenor ótimas obtidas, ultrapassam nos casos de solicitação mais exigente a categoria de pormenor máxima exequível para este tipo de ligação, conduzindo à necessidade de alterações ao nível de robustez de secção por efeito de fadiga.

Refere-se novamente, que pelo facto de não se cumprir a segurança de acordo com as exigências do Eurocódigo para as intensidades mais elevadas, não significa que a ponte bi-viga situada em Nueno se encontra em perigo, ou necessite de algum tipo de intervenção, uma vez que aquando do seu dimensionamento foram cumpridos todos os requisitos presentes na norma Espanhola em vigor. Assim, conclui-se que para o presente caso, e assumindo que a estrutura seria dimensionada na presente data, seriam necessárias categorias de pormenor superiores ou alternativamente reajustar as secções por forma a torná-las mais robustas.

5.5.5.2 Método Simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 2

Submetendo agora a estrutura à metodologia simplificada presente no Eurocódigo 3 – Parte 2, e resgatando todo o procedimento de cálculo já empregue nos casos anteriores, apresentam-se na Tabela 5.48, a título de exemplo de cálculo numérico, os coeficientes de calibração de dano parciais assim como o coeficiente total de dano para ambas as secções analisadas, assumindo:

- IMD de 125 000 veículos pesados por ano;
- Configuração de tráfego de Média Distância do veículo FLM4;

Tabela 5.48 - Coeficientes parciais de dano para IMD de 0,125 milhões de veículos por ano e tráfego de longa distância do veículo de fadiga FLM4

Método Simplificado EC3-2				
	Vão Lateral		Vão Central	
λ_1	2,25		2,05	
λ_2	λ_{2-FLM3}	λ_{2-FLM4}	λ_{2-FLM3}	λ_{2-FLM4}
	0,758	0,643	0,758	0,643
λ_3	1		1	
λ_4	1		1	
λ_{max}	2		2	
λ	1,705	1,446	1,554	1,317

Efetuada o mesmo cálculo para as restantes IMDs e configurações de tráfego do veículo FLM4, obtêm-se os coeficientes totais de dano para as secções de controlo de vão lateral e central, sistematizados na Tabela 5.49

Tabela 5.49 - Coeficientes de dano para o veículo FLM3 e FLM4 em função da Intensidade de tráfego

Veículo de Fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego					
		Vão central 60 m			Vão lateral 40 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
λ_{FLM3}	2	2			2		
λ_{FLM4}		1,785	2	2	1,959	2	2
λ_{FLM3}	0,5	2			2		
λ_{FLM4}		1,353	1,738	1,902	1,484	1,908	2
λ_{FLM3}	0,125	1,554			1,705		
λ_{FLM4}		1,03	1,317	1,442	1,125	1,446	1,582
λ_{FLM3}	0,05	1,293			1,420		
λ_{FLM4}		0,853	1,097	1,200	0,937	1,204	1,317

Sendo conhecidos os coeficientes totais de dano, e o intervalo de tensão provocado pela passagem do veículo de fadiga FLM3, procede-se à verificação da segurança mediante a equação (4.1), comparando a categoria de pormenor reduzida pelo coeficiente parcial de segurança, com o produto do coeficiente total de dano pelo intervalo de tensão provocado pelo modelo FLM3. Os resultados deste procedimento encontram-se na Tabela 5.50,

Tabela 5.50 - Tensão de dano equivalente em função das diferentes intensidades de tráfego

Veículo de Fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão e Cenário de Tráfego					
		Vão central 60 m		$\sigma_{FLM3} = 33,97$ MPa		Vão lateral 40 m	
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2		67,94			89,76	
FLM4		60,64	67,94	67,94	87,92	89,76	89,76
FLM3	0,5		67,94			89,76	
FLM4		45,96	59,04	64,61	66,60	85,63	89,76
FLM3	0,125		52,79			76,52	
FLM4		35,00	44,74	48,98	50,50	64,90	71,00
FLM3	0,05		43,92			63,73	
FLM4		28,98	37,27	40,76	42,05	54,04	59,11

Os resultados a negrito e vermelho, presentes na Tabela 5.50, simbolizam os casos em que a segurança não é cumprida com uma categoria de pormenor 71, reduzida do respetivo coeficiente, na grande maioria de intensidades de tráfego, estendendo-se quase à totalidade de configurações de intensidades de tráfego no caso da secção de vão lateral, tal como previsto pelo Método do Dano Acumulado.

5.5.5.3 Análise comparativa da influência da variação do vão lateral face ao principal

Tal como referido no início da presente secção, para além da verificação de segurança levada a cabo para a secção reajustada de vão lateral e vão central, também se efetuou um estudo comparativo variando o comprimento de vão principal para quatro comprimentos tipo, e variando em cada um deles, o comprimento do vão lateral dentro das proporções habituais de 60% a 100% do comprimento do vão central, à semelhança do caso das pontes caixão contínuas de 3 vãos.

Também no presente caso se apresentarão apenas as conclusões e comentários resultantes da análise crítica dos resultados obtidos para os casos estudados, apresentando-se no Anexo A, sob a forma de tabelas, toda a informação resultante da análise desta tipologia de pontes mistas rodoviárias.

As secções foram reajustadas tal como nos casos anteriores mediante os critérios referidos em 5.4, apresentando-se também no Anexo A, as características seccionais para cada caso (Tabelas A.1.36, A.1.43, A.1.50 e A.1.57) assim como os esforços em Estado Limite Último e a oscilação de momentos fletores para cada veículo de Fadiga (Tabelas A.1.35, A.1.42, A.1.49 e A.1.56):

Analisando os resultados relativos ao Método do Dano Acumulado (Tabelas A.1.37, A.1.44, A.1.51 e A.1.58), verifica-se que o comportamento global da tipologia bi-viga, não difere muito da tipologia em caixão, referindo-se que para os todos os casos analisados se verifica a mesma tendência ascendente, em termos de categoria, no caso da secção de vão central, à medida que o comprimento do vão lateral aumenta. No caso da secção de vão lateral, verifica-se a tendência inversa para os casos de 45, 60 e 70m de comprimento de vão principal tipo (Figuras A.1.25, A.1.26, A.1.29, A.1.30, A.1.33 e A.1.34), ou seja, à medida que o comprimento do vão lateral aumenta face ao vão central, a categoria de pormenor mínima exigida para esta secção vai diminuindo, exceto no caso de comprimento de vão central de 30m (Figuras A.1.21 e A.1.22) em que inicialmente se verifica uma ascensão da categoria necessária, seguida de uma quebra e posterior tendência decrescente, tal como nos restantes casos. Analogamente ao caso das pontes caixão contínuas de 3 vãos, tal comportamento é justificado pelo facto de serem necessárias secções mais robustas, no caso do vão lateral a partir de proporções da ordem dos 75% de comprimento do vão principal, por forma a serem cumpridas as exigências em ELU (excluindo a fadiga), levando a uma maior insensibilidade da secção face aos esforços gerados pelos veículos de Fadiga. Já no caso do vão principal, verifica-se que pelo facto de os esforços de ELU (excluindo a fadiga) serem inferiores, à medida que os comprimentos dos dois vãos se aproximam, o dimensionamento conduz a secções menos robustas, resultando numa maior sensibilidade destas face aos modelos de carga de Fadiga.

Ainda sob a ótica do Método do Dano Acumulado, os resultados revelam novamente a perfeita calibração do veículo de Fadiga FLM3 para reproduzir as piores condições de tráfego e configuração mais exigente do veículo FLM4, em todos os casos estudados, sendo conservador para as restantes configurações de solicitação. Denota-se também que apesar do vão lateral sofrer mais do que o vão central para proporções de 60 a 75% de comprimento de vão lateral, verifica-se que tal conclusão não se verifica quando os comprimentos se igualam, tornando-se o vão central o crítico (Figuras A.1.21, A.1.22, A.1.25, A.1.26, A.1.29, A.1.30, A.1.33 e A.1.34).

Os resultados obtidos através do Método Simplificado do EC3-2 (Tabelas A.1.38, A.1.45, A.1.52 e A.1.59), seguem exatamente o mesmo comportamento anteriormente descrito, denotando-se o facto de este exigir categorias de pormenor inferiores comparativamente com o Método do Dano acumulado. À semelhança do que já se tinha concluído no caso das pontes caixão, também aqui o Método Simplificado EC3-2 cai do lado da insegurança para intensidades de tráfego superiores a 500 mil veículos pesados por ano, agravando-se a discrepância de resultados à medida que se intensificam as condições de tráfego. Este comportamento é explicado novamente pelo facto de a metodologia ser

governada pelo coeficiente limitativo de dano λ_{\max} , impedindo que o produto dos quatro coeficientes de calibração seja superior a 2, para comprimentos de vão superior a 30m.

Analogamente aos casos anteriormente estudados, efetuou-se também uma análise comparativa para ambas as secções de controlo removendo a influência deste coeficiente limitativo, ou seja obtendo a categoria mínima necessária para que a segurança fosse cumprida apenas pelo produto dos coeficientes parciais de dano λ_1 , λ_2 , λ_3 e λ_4 . Os resultados desta aplicação (Tabelas A.1.40, A.1.47, A.1.54 e A.1.61) conduzem, tal como se pode verificar, a categorias superiores às obtidas pelo Método do Dano Acumulado até comprimentos de cerca de 45m, pelas razões já mencionadas aquando da análise do caso das pontes caixão contínuas de 3 vãos. Assim, e tal como já efetuado nos casos anteriores, também neste caso se levou a cabo uma nova análise por forma a aproximar os resultados obtidos através do MDA e Método Simplificado, calibrando o coeficiente λ_{\max} para as respetivas intensidades de tráfego, através da equação (5.24).

Analisando os resultados obtidos nesta nova análise comparativa (Tabelas A.1.41, A.1.48, A.1.55 e A.1.62), percebe-se que a calibração do coeficiente λ_{\max} é bastante eficaz para os casos de comprimentos que conduzem a valores de λ_{\max} originais próximos de 2,2. Não obstante, verifica-se novamente uma discrepância de cerca de 10% para os demais casos pelas mesmas razões do caso anterior, ou seja pelo facto de o fator limitativo λ_{\max} ter conta, tal como o coeficiente λ_1 , o comprimento de influência, sendo este coeficiente igual a 2 a partir de comprimentos de 30m, valor que segundo Freitas (2014), se deveria fixar em 2,2 para a totalidade dos casos. Posto isto, este coeficiente transformar-se-ia num coeficiente λ_{\min} a partir do qual os resultados seriam muito próximos dos resultados obtidos através do Método do Dano Acumulado conduzindo o produto dos 4 coeficientes parciais de dano a categorias de pormenor conservativas.

5.6 CONCLUSÕES

Esta secção encerra o capítulo de análise global à fadiga de pontes mistas rodoviárias encontrando-se aqui resumidas as conclusões gerais resultantes do estudo levado a cabo para cada uma das tipologias analisadas.

Relativamente às pontes mistas em caixão isostáticas sob a ótica do Método do Dano Acumulado conclui-se que,

- A categoria mínima diminui à medida que o comprimento do vão aumenta.
- O veículo de Fadiga FLM3 reproduz a configuração mais exigente do veículo FLM4.
- A categoria de pormenor mais exigente é de 78, para a intensidade de tráfego mais intensa e comprimento de vão de 20m, sendo que esta categoria pode ser facilmente superada tendo em consideração a boa prática de execução de pormenores soldados.
- Para a gama de comprimentos de vãos médios (20m a 60m) estudados, o dimensionamento em ELU parece não ser condicionado pela Fadiga.

Quanto às pontes mistas em caixão contínuas ainda do ponto de vista do Método do Dano Acumulado, refere-se que,

- A categoria mínima na secção de controlo do vão central aumenta com o comprimento do vão lateral em todos os casos de vão principal. No caso da secção de vão lateral, a categoria aumenta para os comprimentos de vão central de 45m e 60m até o comprimento do vão lateral atingir cerca de 75% (35m e 45m respetivamente) do comprimento do vão central e cerca de 66% (50m) no caso de 75m diminuindo a partir destes valores. O caso de 30m é exceção apresentando a categoria uma tendência crescente em todos os casos de vão lateral.
- Também nesta tipologia o veículo FLM3 reproduz as piores condições do veículo FLM4.
- O vão lateral é mais afetado relativamente ao vão central para proporções entre 60% a 75% tornando-se crítica a secção de vão central a partir destas proporções.
- Para as intensidades de tráfego mais exigentes a ordem de grandeza da categoria de pormenor necessária supera em quase todos os casos a categoria assumida de 71, pelo que se recomenda o desenho cuidado e boa conceção de pormenores soldados por forma a garantir categorias mais elevadas. Nos casos em que a categoria máxima de 112 é superada recomenda-se o reajuste seccional por forma a dotar as secções de maior inércia e assim reduzir a sua sensibilidade às cargas cíclicas.
- O dimensionamento em ELU é, em grande parte dos casos estudados, condicionado pela Fadiga exceto nos casos de IMD igual a 50 000 veículos pesados por ano em que se verificam categorias inferiores a 71 na globalidade dos casos.

No caso da tipologia de ponte bi-viga e também sob a ótica do Método do Dano Acumulado, conclui-se que,

- Neste caso, a categoria mínima na secção de vão central aumenta com o comprimento de vão lateral em todos os casos, verificando-se a tendência inversa na secção de controlo de vão lateral, diminuindo com o comprimento do mesmo exceto no caso de vão principal de 30m em que se verifica inicialmente uma tendência ascendente seguida de uma quebra e redução contínua da categoria para os seguintes comprimentos de vão lateral
- Novamente o veículo FLM3 reproduz as condições péssimas de tráfego e configuração de pesados do veículo FLM4.

- Verifica-se também nesta tipologia que o vão lateral sofre mais que o vão central em proporções de vão menores invertendo-se esta conclusão à medida que os comprimentos dos dois vãos se aproximam.
- As categorias exigidas tanto para a secção de vão lateral como para a secção de vão central, superam largamente a categoria máxima exequível de 112 no caso das intensidades de tráfego mais intensas e mesmo em casos de intensidades de tráfego mais reduzidas. Este facto pode dever-se ao funcionamento estrutural desta tipologia de ponte que devido ao funcionamento isolado das vigas metálicas acarreta consigo uma maior sensibilidade às oscilações tensionais provocadas pelas cargas rodoviárias.
- O dimensionamento estrito em Estado Limite Último vê-se extremamente condicionado pela Fadiga, pelo que se recomenda o estudo cuidadoso do volume de tráfego pesado anual a que a estrutura estará sujeita aliada a uma boa conceção de pormenores assim como secções transversais robustas por forma a reduzir o impacto das cargas cíclicas.

Relativamente ao método Simplificado do EC3-2, tendo em conta todos os resultados obtidos, denota-se que,

- A metodologia apresenta sempre resultados inferiores ao Método do Dano Acumulado para intensidades de tráfego superiores a 0,5 milhões de veículos pesados por ano, para ambos os veículos de Fadiga em todas as tipologias analisadas. Esta conclusão é explicada pelo facto do método ser governado pelo coeficiente limitativo de dano λ_{MAX} impedindo que o produto dos coeficientes parciais de dano seja superior a 2 nos casos em que o comprimento de influência é superior a 30m.
- Os resultados da aplicação do método livre da influência do coeficiente limitativo conduzem a resultados sempre conservadores até comprimentos de vão de 45m, pelo que a partir deste valor o coeficiente parcial λ_1 toma valores cada vez mais reduzidos levando a resultados do lado da insegurança. Recomenda-se a adoção de um valor fixo de 2,2 para qualquer comprimento de vão, tal como indicam os estudos de Freitas (2014), tornando assim o método seguro e conservativo.
- A correção do fator limitativo λ_{max} em função da intensidade de tráfego (Equação 5.31) parece reproduzir perfeitamente os resultados do Método do Dano Acumulado para IMDs inferiores a 2 milhões de veículos pesados por ano sempre e quando o valor inicial de λ_{MAX} é próximo de 2,2. Nos casos em que este coeficiente assume valores inferiores verifica-se sempre um défice de cerca de 10% face aos resultados obtidos através do Método do Dano Acumulado. Para a IMD máxima, os resultados são sempre ligeiramente conservadores em todos os casos.
- O método seria conservador em todos os casos de comprimentos de vão, IMDs, e veículos de fadiga adotando um coeficiente de dano mínimo λ_{min} , dado por,

$$\lambda_{MIN} = 2,2 \times \left(\frac{N_{OBS}}{N_0} \right)^{1/5}$$

e adotando os resultados obtidos através do produto dos 4 coeficientes parciais de dano, sendo que o valor de λ_1 se fixaria em 2,2 tal como sugerem os estudos de Freitas (2014). Assim o coeficiente total de dano seria dado por,

$$\lambda = \max(\lambda_{MIN}; 2,2 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4)$$

6.

6

ANÁLISE LOCAL À FADIGA DE SECÇÕES TRANSVERSAIS TÍPICAS DE PONTES MISTAS RODOVIÁRIAS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se analisar a influência da tipologia da secção transversal na sensibilidade das pontes mistas rodoviárias à fadiga.

As características da secção transversal determinam a distribuição pela estrutura das cargas aplicadas ao tabuleiro e portanto afetam diretamente o nível de tensão em cada ponto. Diferentes tipologias de secções transversais podem ter mais ou menos impacto no desenvolvimento de fissuras de fadiga, dependendo das suas características geométricas e do seu funcionamento estrutural, dos pormenores de ligação e da qualidade de execução destes mesmos pormenores.

É portanto de toda a pertinência levar a cabo uma análise de sensibilidade das tipologias transversais mais comuns, fazendo variar os principais fatores que mais afetam a distribuição de cargas e assim retirar conclusões que permitam executar um dimensionamento à Fadiga expedito, correto e seguro.

6.2 TIPOLOGIAS TRANSVERSAIS ESTUDADAS

No âmbito do presente estudo foram analisadas as três tipologias de secção transversal em caixão mais comuns em função do número de vias de circulação,

- Secção em caixão com travessa superior não escorada;
- Secção em caixão com travessa superior escorada;
- Secção em caixão sem travessa superior.

O número de vias de circulação influencia diretamente as características seccionais da estrutura, já que o aumento do número de vias requer maiores dimensões do tabuleiro e secções transversais adequadas para resistir às respetivas solicitações.

Apesar de existirem variações seccionais para diferentes larguras de tabuleiro todas as secções estudadas têm um elemento principal em comum, o caixão metálico, alterando-se apenas o funcionamento estrutural da secção mediante os elementos que funcionam em conjunto consigo e o tipo de conexão à laje de betão.

A tipologia de secção em caixão encontra-se largamente analisada e estudada, sendo o seu funcionamento estrutural bem conhecido, assim como as respetivas vantagens e desvantagens decorrentes da sua utilização. Este tipo de secção é na maior parte das vezes o tipo de secção mais

apelativo pelo seu excelente desempenho mediante a aplicação de cargas excêntricas, ou seja pelo seu bom funcionamento e resistência à flexão e torção.

No caso da empresa de projeto de pontes e estruturas especiais, IDEAM S.A., na qual se enquadrrou a elaboração deste estudo, as soluções em caixão constituem uma solução largamente utilizada para uma extensa gama de vãos, não existindo contudo uma regra de aplicação prática para um determinado comprimento tipo de vão face a outras tipologias, pelo que cada caso constitui uma solução particular.

6.2.1. SECÇÃO EM CAIXÃO COM TRAVESSA SUPERIOR NÃO ESCORADA

6.2.1.1 Descrição e caracterização

A secção em caixão com travessa superior não escorada é o tipo de secção habitualmente utilizado para pontes com 3 vias de circulação. Este tipo de secção é constituída por um caixão metálico ligado através de ligações soldadas a duas travessas metálicas superiores em consola, sendo o funcionamento misto global da secção conferido pela ligação à laje de betão armado, através de conectores de pernos distribuídos ao longo de toda a zona metálica superior. A distribuição espacial genérica transversal das vias de circulação e restantes elementos, assim como as dimensões usuais dos elementos transversais e distribuição em planta encontram-se representados esquematicamente nas Figuras 6.1 e 6.2.

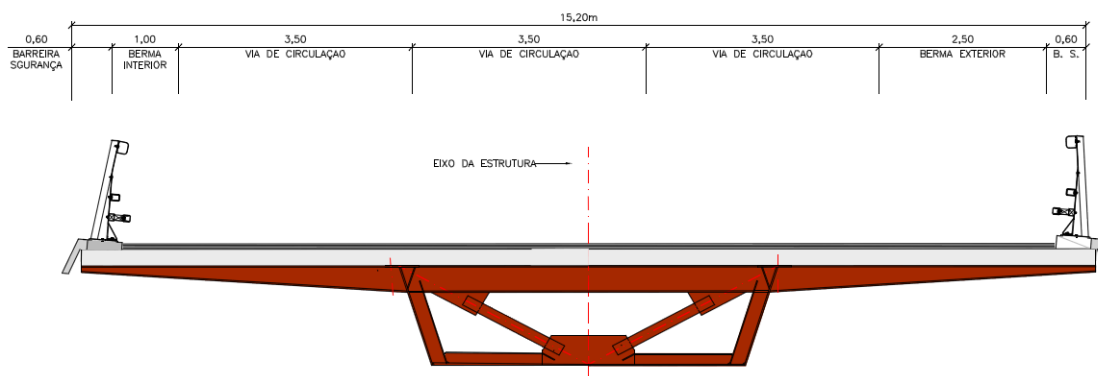


Figura 6.1 – Secção transversal em caixão com travessa superior não escorada

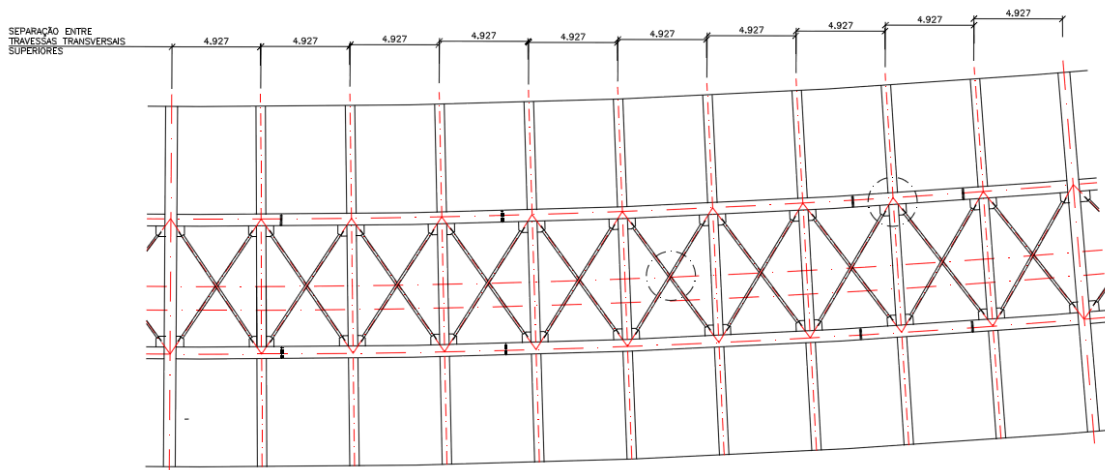


Figura 6.2 – Distribuição em planta das travessas superiores

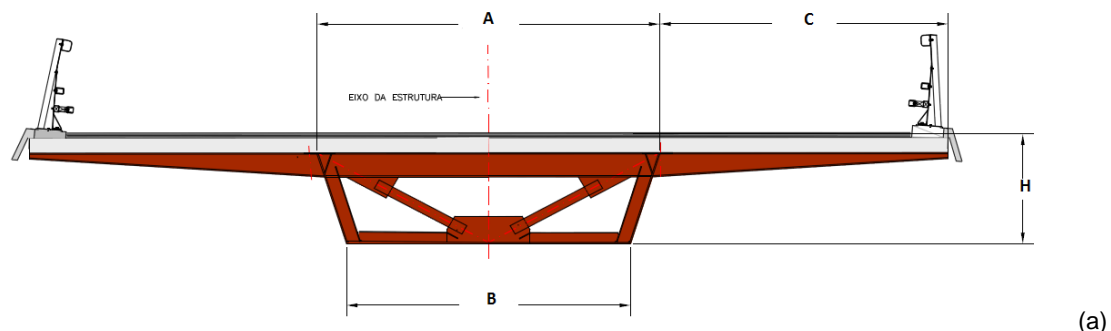
Note-se que a posição dos elementos interiores do caixão, ou treliça interna, em planta coincide com a distribuição das travessas para que se evitem distorções do caixão e assim garantir o seu correto

funcionamento estrutural. Esta distância não deve ultrapassar 4 vezes a dimensão em altura da secção, sendo que no caso das pontes mistas rodoviárias são raros os casos em que este valor supera os 5 m.

O tabuleiro é, como se pode verificar na Figura 6.1, genericamente constituído por 3 vias de circulação de 3,5 m, 1 berma interior de 1 m, 1 berma exterior de 2,5 m e 2 barreiras de segurança com dimensões entre 0,4 e 0,65m dependendo das condições de tráfego e segurança. Neste tipo de configuração de tráfego rodoviário, as dimensões da berma interior e exterior são distintas, pelo facto de existir apenas um sentido de circulação encontrando-se a berma exterior, de maiores dimensões, sempre à direita do sentido de circulação. Os valores acima indicados são os valores típicos, podendo no entanto variar de acordo com as condições de tráfego existentes uma vez que são valores definidos nas normas espanholas de tráfego rodoviário. A largura total desta tipologia de tabuleiro resulta portanto em valores da ordem dos 14,8 m a 15,3 m.

As principais dimensões da secção, representadas pelas letras na Figura a) da Tabela 6.1, assumem valores típicos em função da tipologia de ponte e da importância dos seus vãos. Por exemplo, a altura total da secção (caixão mais laje) em pontes contínuas é normalmente 24/25 vezes menor que o comprimento do vão entre apoios assim como o afastamento entre elementos transversais em planta não deve ultrapassar mais de 4 vezes a altura total da secção para não conduzir a um dimensionamento exagerado tanto da laje como da travessa superior, assim como para impedir a distorção do caixão. Na Tabela 6.1 apresentam-se os valores usuais para as dimensões principais dos elementos transversais.

Tabela 6.1 – Regras práticas para obtenção das principais dimensões dos elementos transversais



	Pontes Contínuas	Pontes Isostáticas
A – Largura superior do caixão	$4\text{m} < A < 6\text{m}$	$4\text{m} < A < 6\text{m}$
B – Largura inferior do caixão	$\approx A - 0.8/1.0/1.2\text{ m}$	$\approx A - 0.8/1.0/1.2\text{ m}$
C – Comprimento da travessa	$\approx \frac{(15\text{ m} - A)}{2}$	$\approx \frac{(15\text{ m} - A)}{2}$
H – Altura total da secção	$\approx \frac{\text{Comprimento vão}}{24}$	$\approx \frac{\text{Comprimento vão}}{20}$
L – Afastamento em planta	$2xH < L < 4xH$ Em que $L < 5/6\text{ m}$	$2xH < L < 4xH$ Em que $L < 5/6\text{ m}$

6.2.1.2 Funcionamento estrutural e elementos críticos

O funcionamento estrutural desta tipologia seccional é na verdade bastante simples, uma vez que as travessas superiores constituem elementos em consola encastrados no caixão (Figura 6.3).

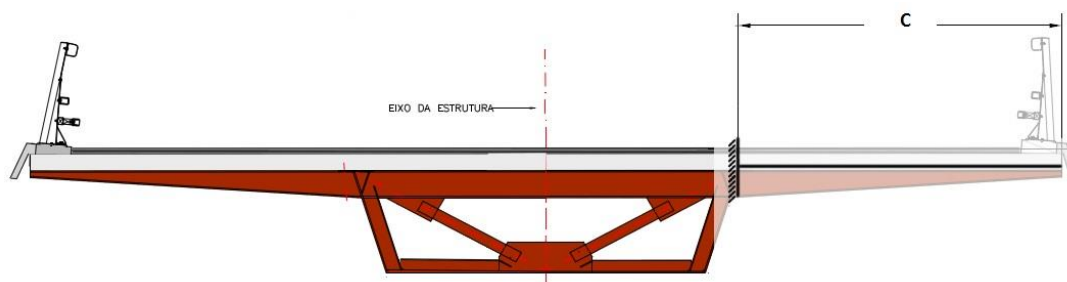


Figura 6.3 – Modelo adotado para a travessa superior não escorada

O fluxo de esforço rasante, decorrente da excentricidade das sobrecargas, é transmitido através dos conectores de pernos ao longo da travessa superior, sendo a carga introduzida no fluxo de torção do caixão de forma uniforme ao longo de todo o montante superior, pelo facto de todo este elemento se encontrar ligado à laje de betão. Este funcionamento conjunto do montante superior e da laje pode gerar esforços de tração importantes na laje que devem ser acautelados. A Figura 6.4 esquematiza o fluxo rasante transmitido por uma carga excêntrica.

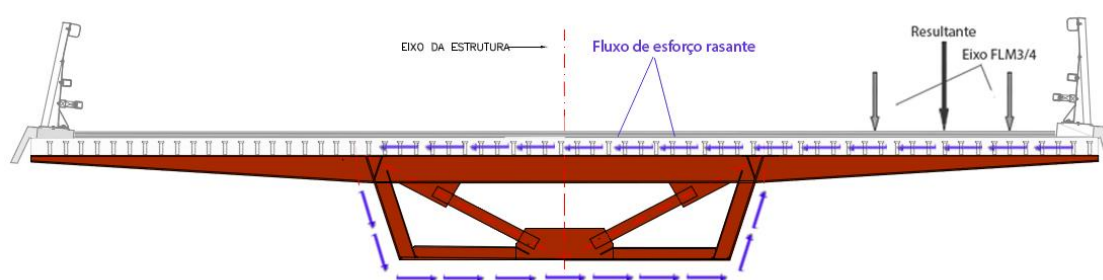


Figura 6.4 – Representação esquemática do fluxo de esforço rasante devido a cargas excêntricas

As travessas superiores serão, neste caso, os elementos críticos passíveis de sofrerem problemas de fadiga pois é na ligação destes ao caixão metálico que se produz o momento fletor máximo e também o ponto onde se produzem discontinuidades e ligações de secções, constituindo pontos de concentração de tensões. A Figura 6.5 ilustra o pormenor de ligação das travessas de ligação ao caixão.

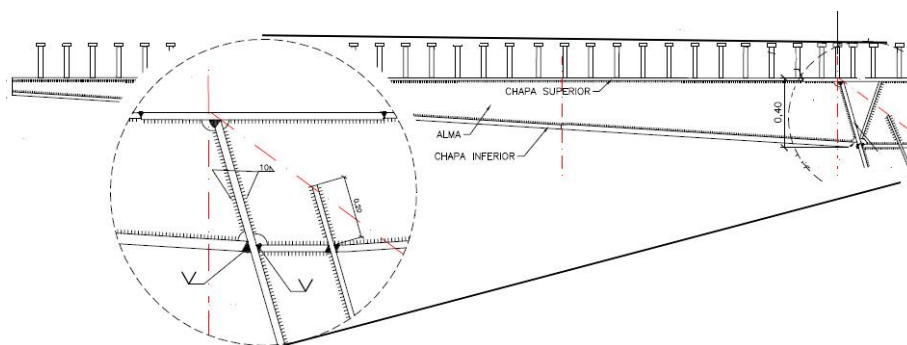


Figura 6.5 – Zona crítica da travessa superior não escorada

O esforço na ligação crítica é obtido isostaticamente, através do produto da resultante das cargas correspondentes a cada eixo do veículo de Fadiga, pela distância ao ponto crítico a ser analisado, tal como se ilustra na Figura 6.6.

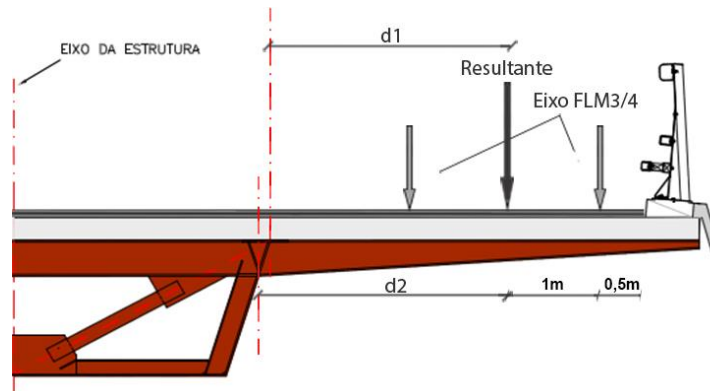


Figura 6.6 – Momento gerado pelo veículo de fadiga na ligação ao caixão metálico

As distâncias representadas pela letra $d1$ e $d2$ são obtidas por pura definição de *notional lane*, sendo que o pior cenário, ou seja aquele que confere maior excentricidade ao veículo de fadiga, é aquele que confere uma distância mínima de 0,5 m à barreira de segurança.

6.2.1.3 Critérios de modelação

Sendo conhecido o funcionamento estrutural da secção, procedeu-se à modelação da mesma, recorrendo a um modelo de consola tal como ilustrado na Figura 6.3. Uma vez que as travessas se encontram separadas longitudinalmente de uma determinada distância, a resultante de carga absorvida por cada uma delas pode não corresponder à totalidade do veículo de fadiga, uma vez que cada veículo possui uma determinada configuração e separação entre eixos. Assim, por forma a obter resultados o mais fiáveis, corretos e realistas possíveis procedeu-se à simulação longitudinal das travessas, separadas de distâncias usuais na prática de projeto, por forma a obter a reação máxima decorrente da passagem do veículo de fadiga. Para conseguir tal efeito, desenvolveu-se em *SofiStik* (software de cálculo automático usado pela empresa IDEAM S.A.) um modelo de barras simplesmente apoiadas com 10 tramos, representativo de uma distância longitudinal significativa do tabuleiro de forma a obter a resultante de carga máxima possível numa travessa. As Figuras 6.7 e 6.8 ilustram o modelo desenvolvido por forma a obter a reação máxima numa travessa fixando um determinado espaçamento entre travessas consecutivas. Note-se que na Figura 6.8 cada um dos apoios corresponde a uma travessa.

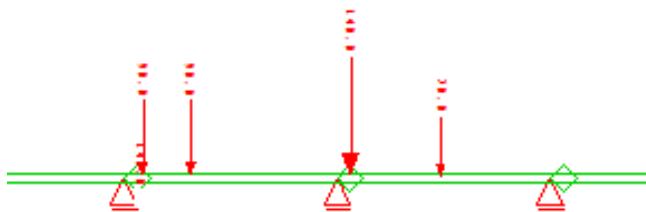


Figura 6.8 – Modelo longitudinal representativo do afastamento em planta entre travessas consecutivas

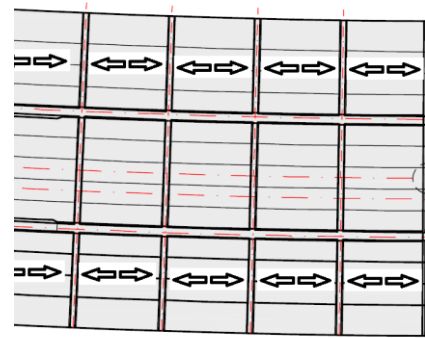


Figura 6.7 – Representação esquemática da distribuição das cargas em planta entre travessas

Simulando a passagem dos diferentes veículos pesados-tipo do modelo FLM4, é possível conhecer a reação máxima numa travessa, correspondendo esta reação à resultante ilustrada na Figura 6.6. Refere-se no entanto, que os resultados obtidos serão ligeiramente conservadores uma vez que se prescinde da capacidade de flexão da laje na direção ortogonal ao sentido longitudinal do tabuleiro, ou seja no sentido da secção transversal, pelo facto da distribuição das cargas ser efetuada isostaticamente apenas entre cada travessa.

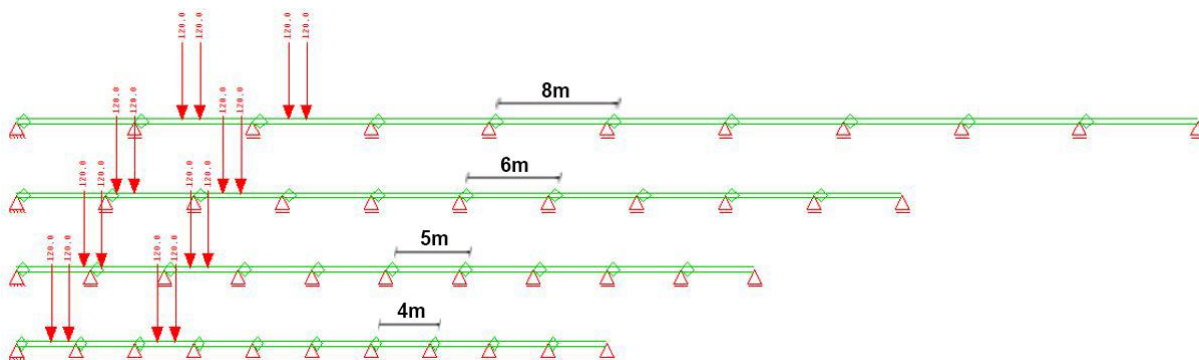


Figura 6.9 – Modelos longitudinais com diferentes afastamentos tipo (4, 5, 6 e 8 m) entre travessas consecutivas

Por forma a avaliar o impacto de diferentes separações longitudinais entre travessas consecutivas, realizaram-se simulações para separações de 4, 5, 6 e 8 m entre cada um destes elementos, por forma a avaliar posteriormente o efeito na reação máxima obtida na travessa crítica decorrente da passagem de cada veículo. (Figura 6.6).

6.2.2. SECÇÃO EM CAIXÃO COM TRAVESSA SUPERIOR ESCORADA

6.2.2.1 Descrição e caracterização

A partir de determinadas dimensões de tabuleiro, o uso de travessas superiores em consola tornar-se-ia inconcebível devido às exigências de dimensionamento tanto da laje como das travessas. É o caso dos tabuleiros de 4 vias de circulação, que totalizam dimensões da ordem dos 26m de largura, recorrendo-se nestes casos ao uso de escoras transversais, permitindo assim aliviar o esforço de flexão na zona de ligação da travessa ao caixão, através da alteração do funcionamento estrutural da secção. Este tipo de secção é portanto em tudo similar à tipologia descrita anteriormente, à exceção da existência de duas escoras transversais inclinadas, que fornecem apoio às travessas superiores. Esta zona de apoio das travessas é habitualmente realizada um pouco antes da extremidade da travessa recebendo apoio longitudinal através de vigas de bordo. O funcionamento misto e a distribuição em planta do conjunto destes elementos é semelhante à da secção anterior pelas razões já referidas aquando da sua descrição.

Encontra-se esquematizado na Figura 6.10, a distribuição espacial das vias de circulação e dos restantes elementos do tabuleiro nesta tipologia de secção transversal.

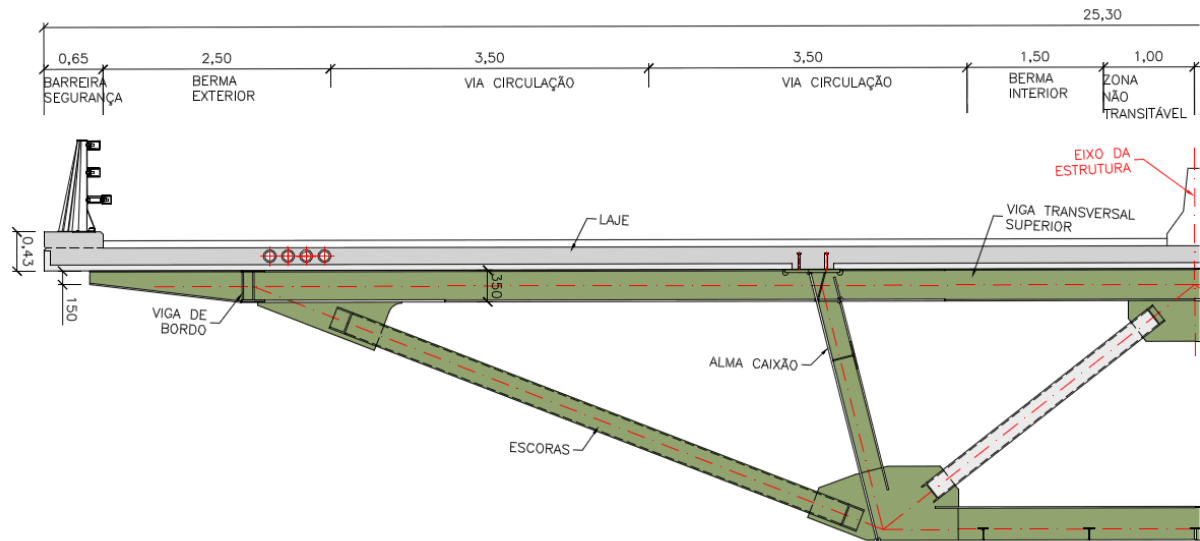


Figura 6.10 – Secção transversal em caixão com travessa superior escorada

Como se pode observar na Figura 6.10, o tabuleiro é constituído por 2 vias de circulação de 3,5m, uma bermas exterior de 2,5m, uma bermas interior de 1,5m, 1m de zona não transitável até ao separador central e finalmente entre 0,4m a 0,65m de barreira de segurança, repetindo-se esta distribuição por simetria, totalizando assim dimensões entre 24,8m e 25,3m. Neste caso, como o número de vias de circulação é par, leva a que todas as dimensões sejam simétricas.

As dimensões usuais dos principais elementos transversais para esta tipologia de secção encontram-se resumidos na tabela abaixo à semelhança da secção anteriormente descrita.

Tabela 6.2 - Regras práticas para obtenção das principais dimensões dos elementos transversais

	Pontes Contínuas	Pontes Isostáticas
A – Largura superior do caixão	$4\text{m} < A < 6\text{m}$	$4\text{m} < A < 6\text{m}$
B – Largura inferior do caixão	$\approx A - 0.8/1.0/1.2\text{ m}$	$\approx A - 0.8/1.0/1.2\text{ m}$
C – Comprimento da travessa	$\approx \frac{(26\text{ m} - A)}{2}$	$\approx \frac{(26\text{ m} - A)}{2}$
H – Altura total da secção	$\approx \frac{\text{Comprimento vão}}{24}$	$\approx \frac{\text{Comprimento vão}}{20}$
L – Afastamento em planta	$2xH < L < 4xH$ Em que $L < 5/6\text{ m}$	$2xH < L < 4xH$ Em que $L < 5/6\text{ m}$

6.2.2.2 Funcionamento estrutural e elementos críticos

Ao contrário da tipologia analisada anteriormente, o funcionamento da secção não é tão elementar devido à hiperstaticidade conferida pelo funcionamento conjunto da travessa superior com a escora. Neste caso, o momento fletor originado pela excentricidade máxima da sobrecarga rodoviária será anulado através do binário de reações constituído pelo esforço de tração na parte superior da secção, ou seja na travessa superior e na laje, e pelo esforço de compressão gerado na escora. Para além disso, a travessa superior passa a funcionar em flexão positiva, devido ao apoio conferido pela escora, e negativa na zona de ligação ao caixão.

Posto isto, os elementos críticos serão a travessa superior e a escora, já que estes dois elementos são os principais protagonistas na resistência e introdução das cargas no fluxo global resistente da secção. Encontram-se ilustrados na Figura 6.11 os elementos e pormenores de ligações tanto da travessa como da escora.

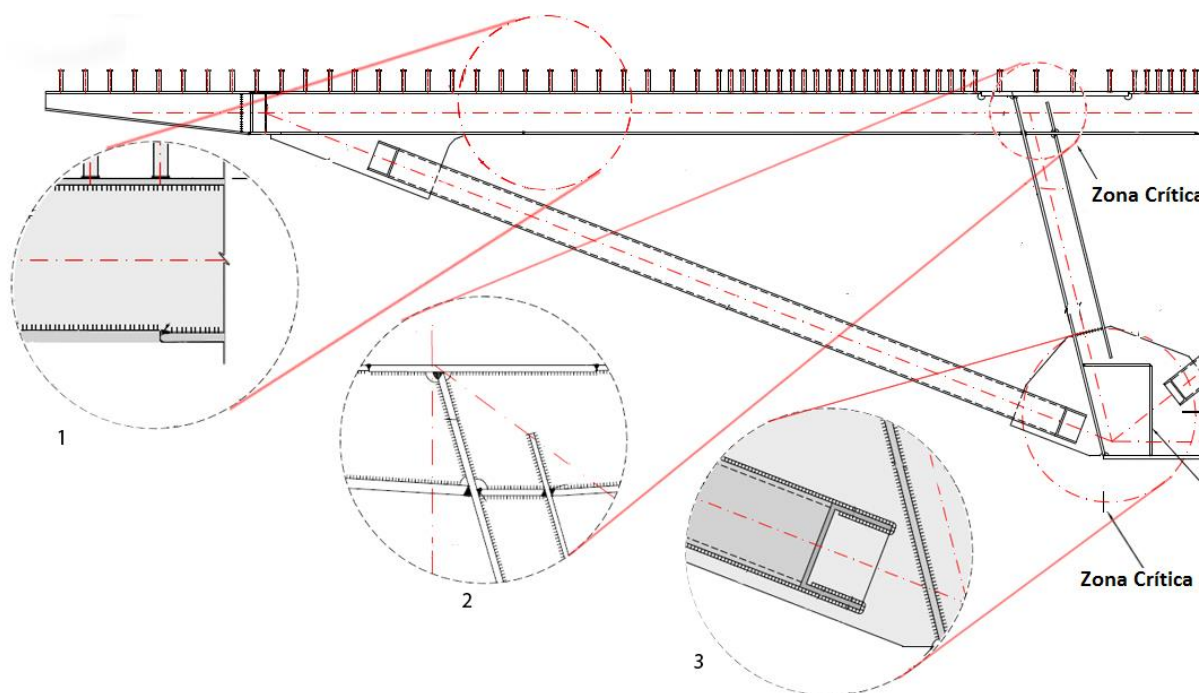


Figura 6.11 – Zonas críticas da tipologia seccional em caixão com travessa superior escorada

As secções críticas correspondem de acordo com o que já fora referido, e como se pode observar na Figura 6.11, à zona de ligação da travessa superior com o caixão, à zona de momento fletor positivo na travessa superior, pelo facto de existir uma alteração na secção transversal, e por fim a zona de ligação da escora tanto à travessa como à alma do caixão.

Finalmente, pelo facto de a secção constituir um sistema hiperstático, os esforços nas secções críticas serão obtidos através de um modelo desenvolvido em *SofiStik*, modelo este explicitado e detalhado no ponto seguinte.

6.2.2.3 Critérios de modelação

Por forma a obter os esforços nos elementos e secções críticas evidenciadas no ponto anterior, recorreu-se à construção de um modelo plano em *Sofistik*, reproduzindo as características tanto geométricas como de rigidez da secção transversal. A Figura 6.12 ilustra um exemplo do modelo plano desenvolvido.

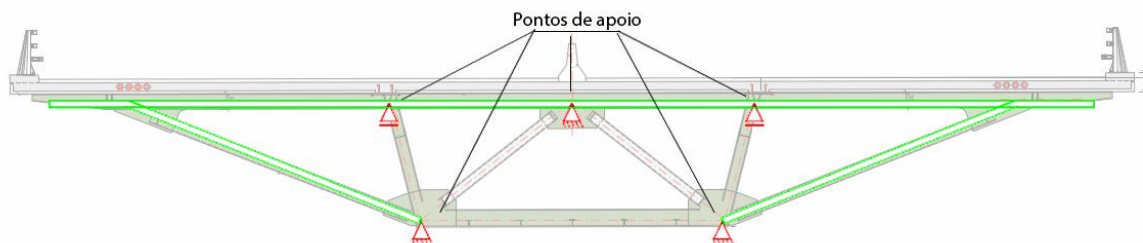


Figura 6.12 – Representação esquemática do modelo desenvolvido

Como se pode observar na Figura 6.12, o modelo é constituído pela zona superior da secção funcionando em conjunto com as escoras metálicas, simulando os pontos rígidos de apoio conferidos pelo caixão e treliça interna através de apoios.

É importante frisar que, devido ao facto do modelo ser hiperestático os esforços decorrentes das cargas aplicadas variarão de acordo com as características mecânicas (área, inércia) atribuídas a cada uma das barras, pelo que se definiram características de secção fissurada na zona de ligação da travessa superior ao caixão, por ser uma zona predominantemente de flexão negativa, e características de secção bruta, à zona entre a ligação ao caixão e apoio da escora, por ser uma zona predominantemente de flexão positiva.

No que toca à modelação das cargas dos veículos, também neste caso se procedeu de forma análoga à secção anterior, ou seja, a resultante correspondente ao eixo do veículo de Fadiga atuante em cada travessa, é determinada isostaticamente simulando a sua passagem no modelo de barras simplesmente apoiadas (Figura 6.8). Assim, é possível determinar a parcela de carga absorvida por cada travessa e consequentemente a reação máxima na travessa crítica, para um determinado afastamento em planta entre dois destes elementos consecutivos.

Uma vez que a travessa superior não trabalha unicamente em flexão negativa, como no caso anteriormente explicitado, o seu funcionamento e os esforços nos pontos críticos variarão de acordo com a posição transversal da carga do veículo no tabuleiro. Posto isto, realizou-se uma simulação de passagem transversal do veículo de fadiga na secção, tendo em vista a obtenção da envolvente de esforços cobrindo assim todas as possibilidades de ocupação espacial do veículo na secção. O ponto inicial desta simulação corresponde ao ponto de excentricidade máxima, novamente por pura definição de *Notional Lane* (0,5 m da barreira de segurança). O processo de variação de posição da resultante correspondente ao eixo do veículo de fadiga na secção transversal encontra-se ilustrado na Figura 6.13.

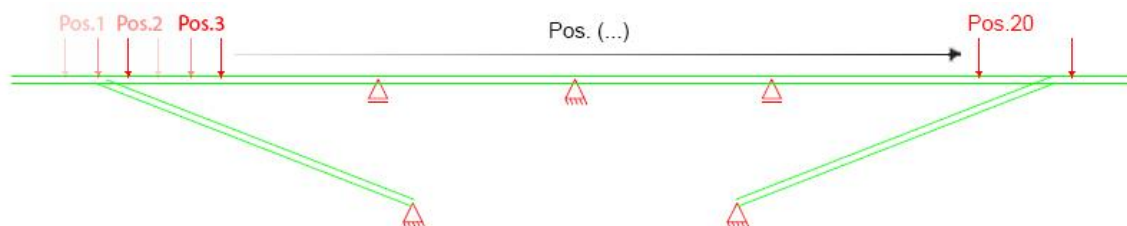


Figura 6.13 – Simulação da passagem transversal dos veículos

6.2.3. SECÇÃO EM CAIXÃO SEM TRAVESSA SUPERIOR

6.2.3.1 Descrição e caracterização

Em pontes destinadas à implementação de apenas 1 ou 2 vias de circulação, a largura do tabuleiro toma dimensões mais reduzidas, levando a alterações na secção transversal. A largura típica desta tipologia de tabuleiros situa-se normalmente entre os 7 m e os 11 m dependendo do número de vias de circulação e das condições de tráfego a que o tabuleiro estará sujeito, podendo existir exceções que requeiram dimensões ligeiramente superiores. As dimensões do caixão metálico mantêm-se inalteradas na zona superior, ou apresentam variações pouco significativas, relativamente às tipologias discutidas em 5.2.1 e 5.2.2 variando entre os 2,5 m e os 3,4 m na zona inferior, sendo a grande alteração proveniente da ausência da travessa superior e no mecanismo de funcionamento misto da secção. Tal como nas tipologias analisadas anteriormente apresenta-se nas Figuras 6.14 e 6.15 uma secção tipo com a distribuição espacial dos elementos do tabuleiro para 1 e 2 vias de circulação, respetivamente.

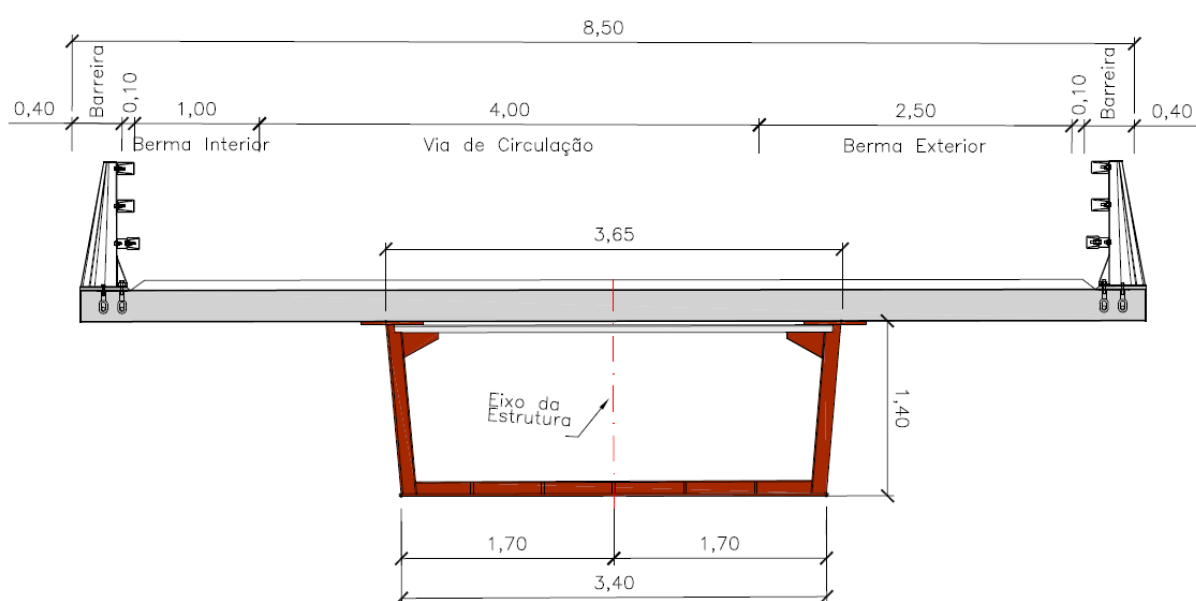


Figura 6.14 – Secção transversal em caixão sem travessa superior com 1 via de circulação

Como se pode verificar na Figura 6.14 o tabuleiro é constituído por uma única via de circulação de 4 m, 1 berma de 2,5 m do lado direito relativamente ao sentido de circulação, 1 berma de 1,5 m e 2 barreiras de segurança com dimensões da mesma ordem de grandeza das secções anteriores (entre 0,4 e 0,65 m).

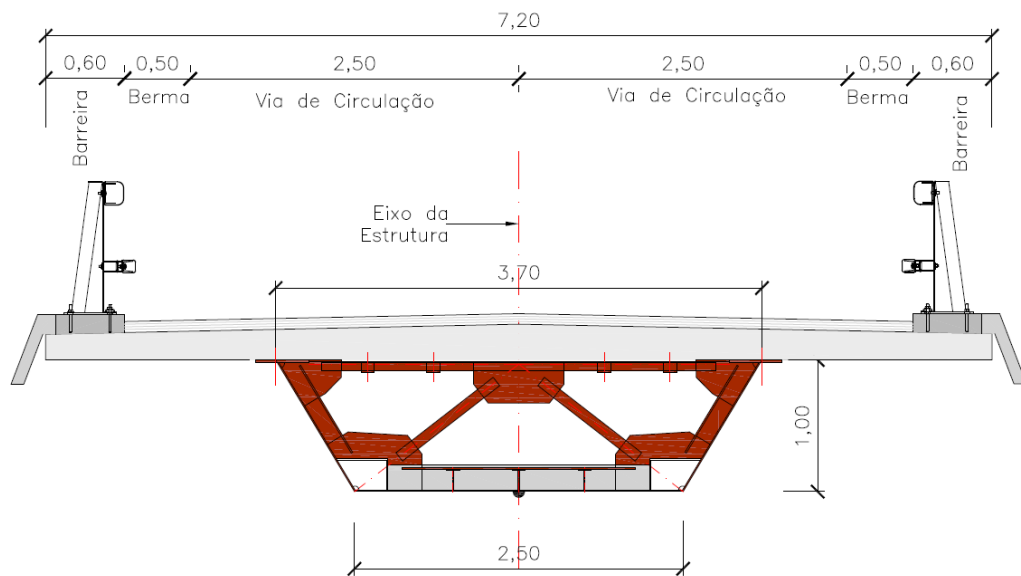


Figura 6.15 – Secção transversal em caixão sem travessa superior com 2 vias de circulação

Considerando a existência de 2 vias de circulação estas tomam dimensões da ordem dos 2,5 a 3,5 m e 2 bermas de iguais dimensões. A variação do número de vias de circulação está obviamente dependente da artéria rodoviária em que a estrutura se encontra inserida.

Este tipo de secção transversal é constituída, como já referido anteriormente, por um caixão metálico e uma laje de betão armado funcionando em conjunto através de conectores de perno dispostos apenas ao longo dos banzos superiores longitudinais do caixão, como se pode verificar na Figura 6.16, contrariamente às tipologias descritas nos pontos anteriores em que esta ligação se materializava ao longo de todo o montante superior do caixão e da travessa superior. Esta alteração terá repercussões, como se verá adiante, ao nível do funcionamento estrutural misto da secção.

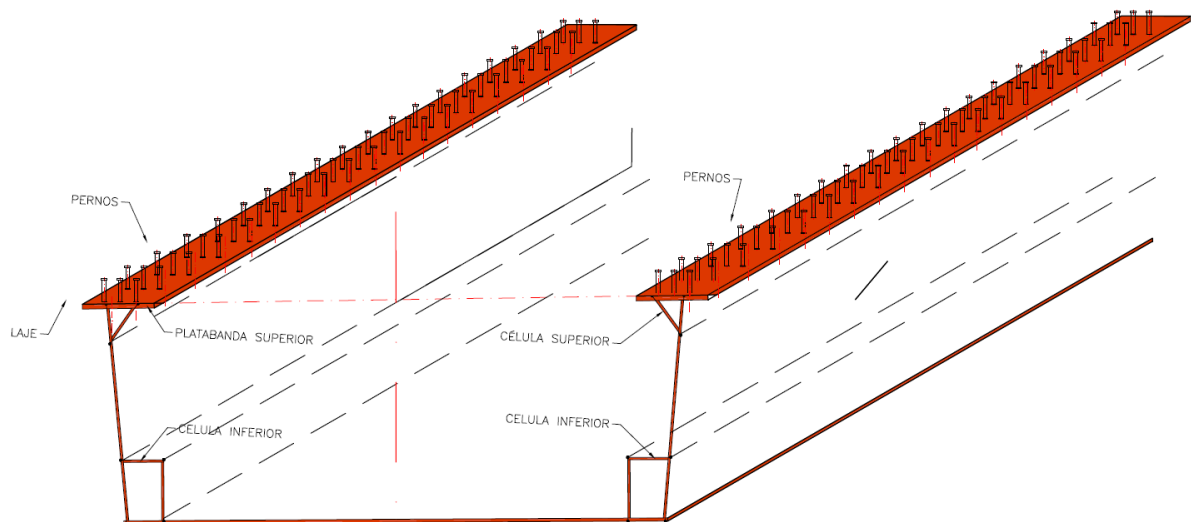


Figura 6.16 – Pormenor da existência de conectores de perno apenas na banzo superior

Em caixões metálicos de alma de espessura reduzida, é necessário impedir a deformabilidade transversal e a distorção entre almas, para que este funcione correta e eficazmente. Há várias formas de conseguir tal efeito, nomeadamente mediante o uso de diafragmas de alma cheia, rigidizadores perimetrais ou através de treliças interiores sendo esta última a metodologia mais frequentemente utilizada, e consequentemente os elementos que a constituem os principais alvos de sofrer fenómenos de fadiga, devido ao funcionamento misto intrínseco de secções com estas características. Estes elementos encontram-se afastados de no máximo uma distância igual a quatro vezes a altura total da secção, precisamente para garantir a rigidez transversal do conjunto.

Existem duas tipologias principais de treliças internas, treliças tipo M ou tipo W (Figura 6.17 e Figura 6.18), denominação atribuída pela forma como os elementos se dispõem no interior do caixão. Nas treliças tipo M, as diagonais partem da zona superior da alma ligando-se no ponto central da chapa de fundo do caixão mediante chapas de gusset.

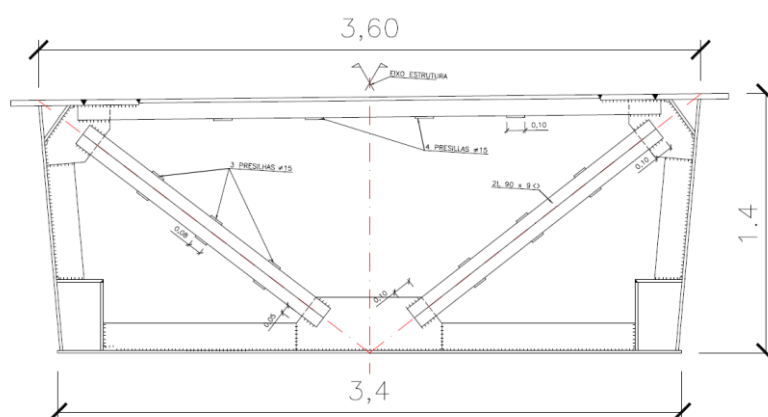


Figura 6.17 – Exemplo de treliça tipo M

Na treliça tipo W partindo da zona inferior das almas, as diagonais lançam-se através da secção unindo-se no ponto central do montante superior do caixão também através de chapas de gusset tal como se pode observar na Figura 6.18.

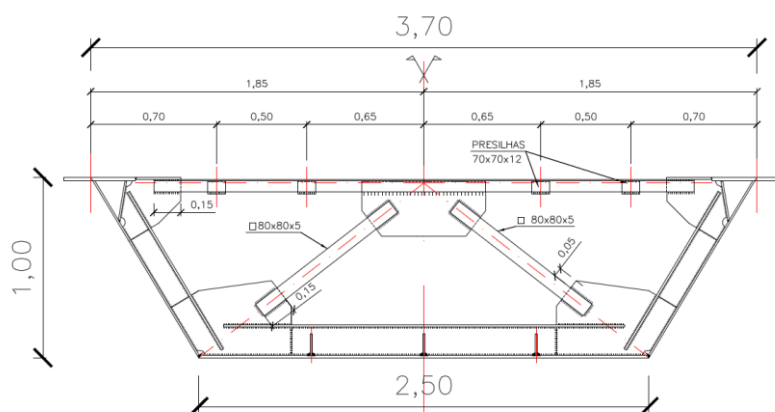
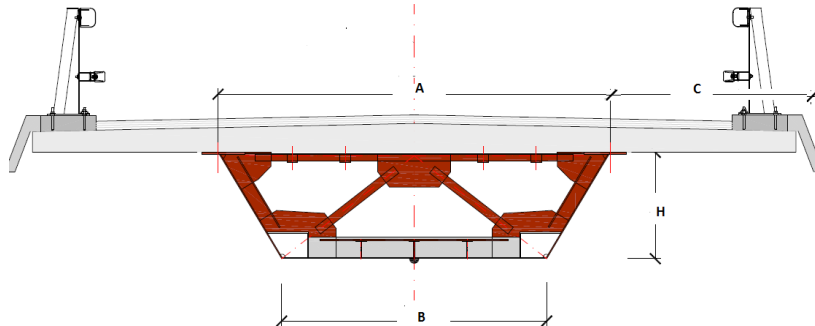


Figura 6.18 – Exemplo de treliça tipo W

Refere-se novamente que os elementos de montante superior, tanto no caso da treliça tipo M como tipo W, não se encontram ligados à laje de betão armado, sendo a sua ligação materializada apenas nos banzos superiores.

As principais dimensões da secção transversal, ou seja altura, largura superior e inferior do caixão, assim como o comprimento das consolas transversais enquadram-se na mesma ordem de grandeza do que já fora referido nos casos anteriores, apresentando a Tabela 6.3 valores genéricos de referência.

Tabela 6.3 - Regras práticas para obtenção das principais dimensões dos elementos transversais



	Pontes Contínuas	Pontes Isostáticas
A – Largura superior do caixão	$3\text{m} < A < 4\text{m}$	$3\text{m} < A < 4\text{m}$
B – Largura inferior do caixão	$\approx A - 0.8/1.0/1.2 \text{ m}$	$\approx A - 0.8/1.0/1.2 \text{ m}$
C – Porção de laje em consola	$\approx \frac{(10 \text{ m} - A)}{2}$	$\approx \frac{(10 \text{ m} - A)}{2}$
H – Altura total da secção	$\approx \frac{\text{Comprimento do vão}}{24}$	$\approx \frac{\text{Comprimento do vão}}{20}$
L – Afastamento em planta	$2xH < L < 4xH$ Em que $L < 5/6 \text{ m}$	$2xH < L < 4xH$ Em que $L < 5/6 \text{ m}$

6.2.3.2 Funcionamento estrutural e elementos críticos

O funcionamento estrutural deste tipo de secção é repartido entre a laje de betão armado e o caixão metálico. As cargas excêntricas são “injetadas” no fluxo global de funcionamento da secção através dos conectores de perno existentes nos banzos superiores do caixão, sendo esta facilitada pelos elementos de treliça interna. Note-se que, pelo facto de a laje de betão armado se encontrar apenas ligada na zona das banzos superiores e não ao longo de todo o elemento transversal superior do caixão, leva a que esta fique livre do esforço axial resultante do esforço rasante originado pelas cargas excêntricas, funcionando assim o caixão metálico essencialmente como um sistema articulado plano, resistindo apenas a esforços axiais, dando apoio à laje de betão armado na zona das banzos superiores, funcionando esta através de flexão transversal.

Os elementos críticos desta tipologia seccional serão os elementos constituintes do caixão metálico (Figura 6.19), ou seja, o montante superior, o elemento inferior, as almas e as diagonais da treliça interna, sendo críticas todas as secções onde se produza uma ligação, devendo estas ser alvo de um estudo mais cuidado.

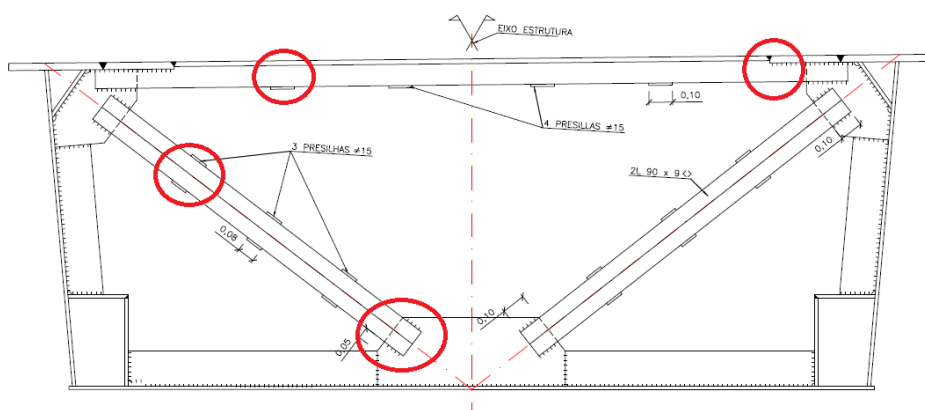


Figura 6.19 – Pontos críticos do caixão metálico

Os montantes superiores e as diagonais são normalmente constituídos por duplos perfis funcionando monoliticamente através de chapas afastadas de uma determinada distância. As diagonais podem também ser materializadas através de perfis ocios laminados alterando-se mediante cada caso a respetiva ligação às chapas de gusset, constituindo esta uma ligação crítica (Figura 6.20 e Figura 6.21).

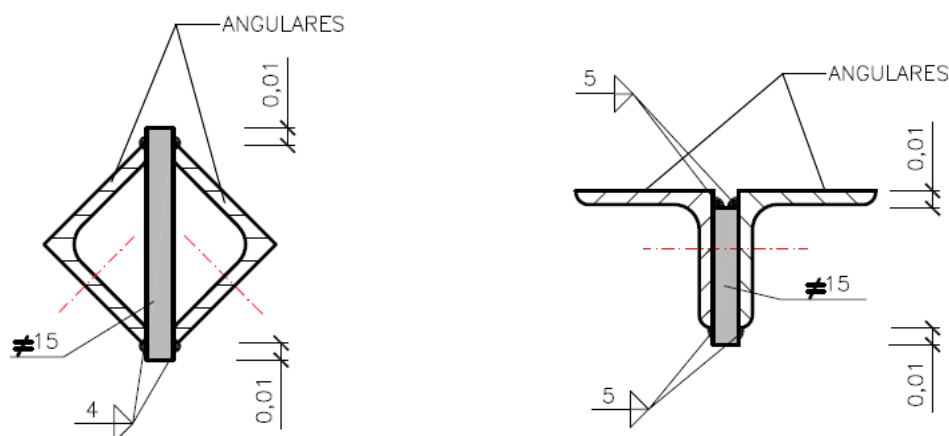


Figura 6.20 – Perfis duplos unidos através de presilhas

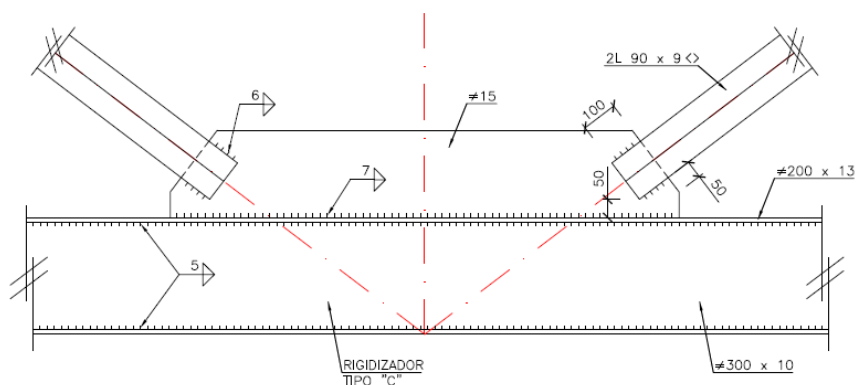


Figura 6.21 – Pormenor da ligação das diagonais à chapa de Gusset

6.2.3.3 Critérios de modelação

Como já referido anteriormente, nos casos em que apenas existe conexão na zona do banzo superior, a laje de betão armado funciona unicamente em flexão transversal, transmitindo as cargas através dos apoios conferidos pelos banzos superiores. Posto isto, o sistema estrutural foi modelado, em *Sofistik*, separando a laje do caixão metálico, constituindo a primeira o modelo de uma barra simplesmente apoiada, e o segundo, um modelo de um sistema articulado plano, tal como se pode observar na Figura 6.22.

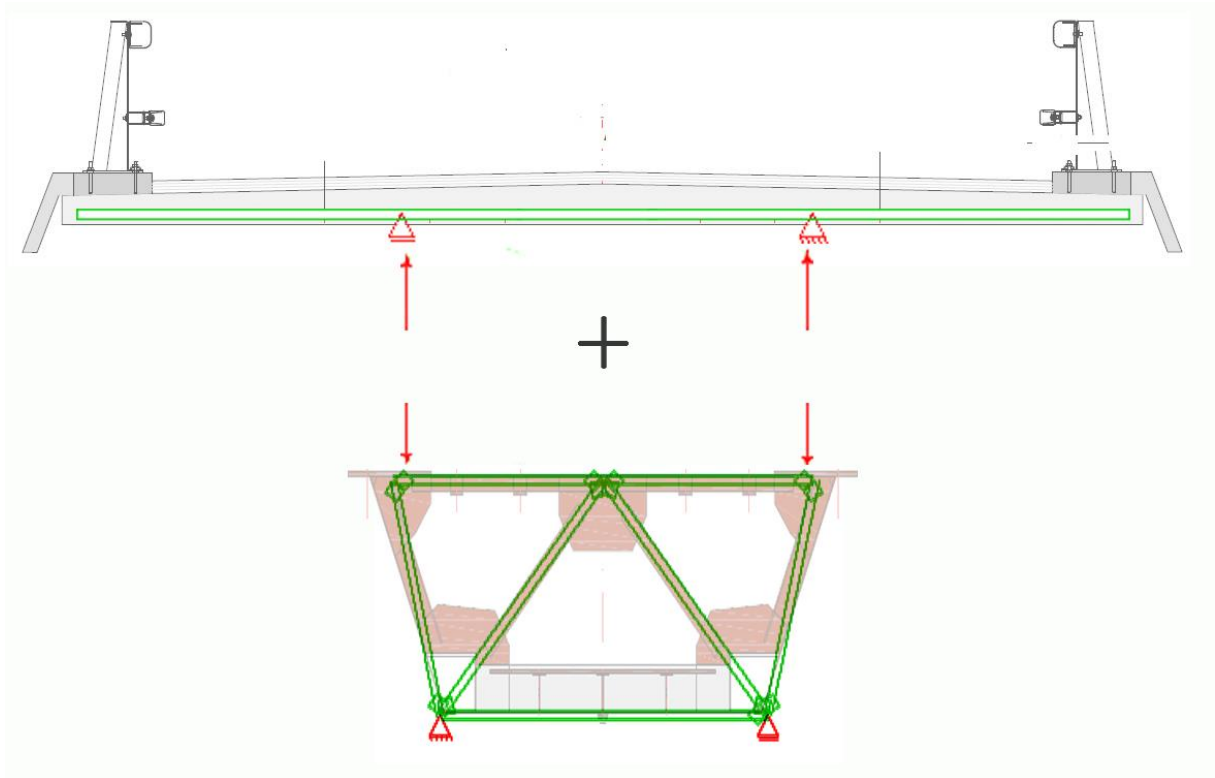


Figura 6.22 – Representação esquemática do sistema estrutural modelado

Por forma a modelar as ações excêntricas correspondentes aos veículos de Fadiga, procedeu-se à modelação separadamente em dois casos, o caso simétrico e antissimétrico tendo os esforços finais sido obtidos através do princípio da sobreposição dos efeitos. A Figura 6.23 esquematiza o procedimento mencionado.

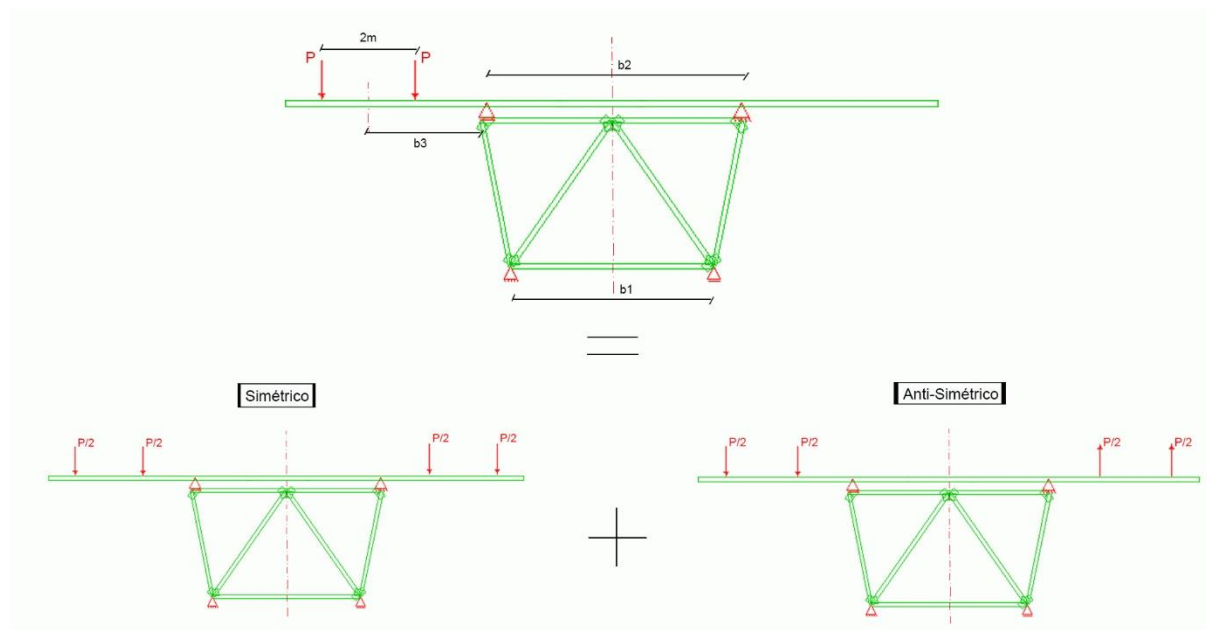


Figura 6.23 – Esquema do procedimento de cálculo usado para cargas excêntricas

Assim, mediante o caso de solicitação, o sistema articulado plano recebe a reação correspondente. No caso simétrico a reação nos apoios, ou seja a carga transmitida ao caixão corresponde a P , repartida igualmente pelas duas almas, tal como se ilustra na Figura 6.24,

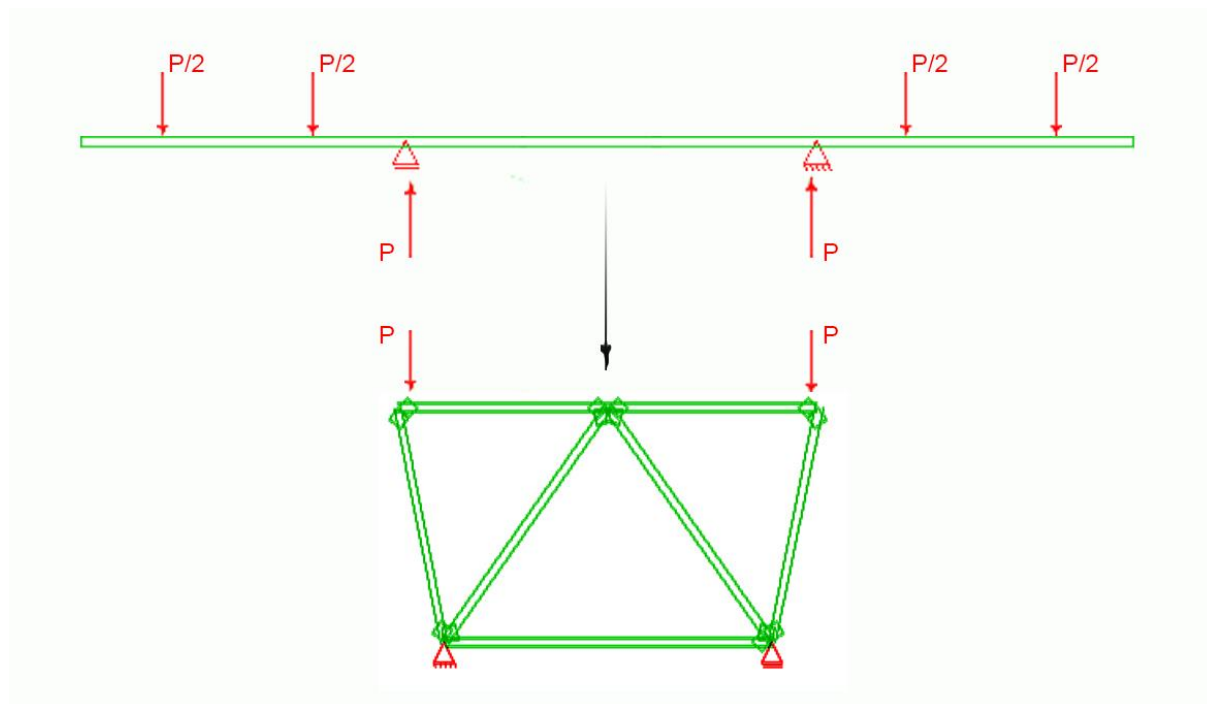


Figura 6.24 – Carga transmitida ao caixão no caso de carga simétrica

Analogamente no caso antissimétrico a solicitação transmitida ao caixão corresponde à reação nos apoios, P' como se pode observar na Figura 6.25,

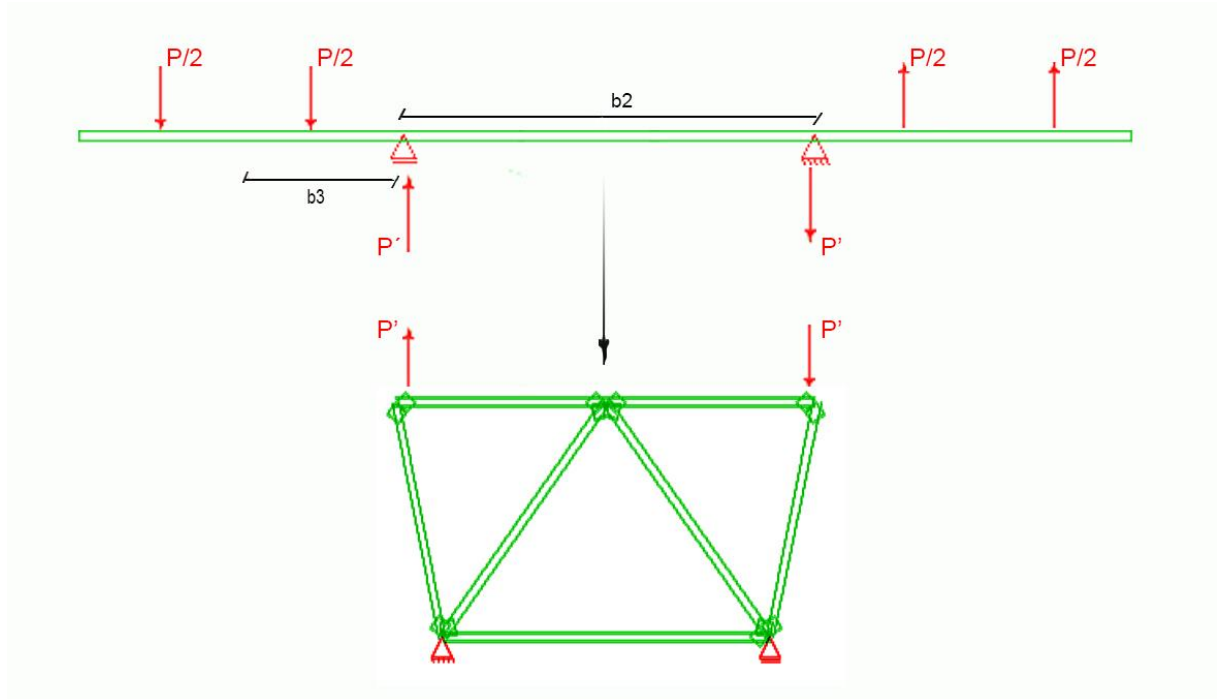


Figura 6.25 – Carga transmitida ao caixão no caso de carga antissimétrica

Sendo P' dado pela expressão,

$$P' = P \times \left(1 + \frac{2 \times b_3}{b_2}\right) \quad (6.1)$$

Substituindo a carga P e P' pela correspondente associada a cada veículo-tipo do modelo de Fadiga FLM4, e sobrepondo os resultados de cada caso de carga, obtêm-se os esforços finais na treliça interna. Este procedimento é repetido para ambas as tipologias, treliça tipo M e W (Figura 6.26).

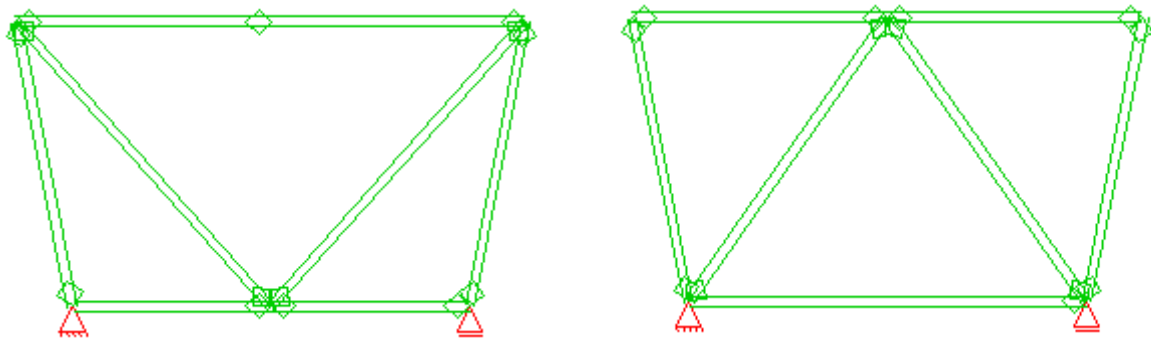


Figura 6.26 – Modelo plano de uma treliça tipo M e W (esquerda e direita)

É importante referir, que os apoios inferiores introduzidos nos modelos de treliça não existem na realidade, pois a carga é difundida longitudinalmente através das almas, sendo a sua existência virtual apenas necessária para garantir estabilidade numérica do cálculo. Para simular o efeito de difusão das cargas na alma, assim como substituir o efeito conferido pelos apoios, procurou-se equilibrar as cargas externas introduzidas, no caso simétrico através de uma carga distribuída ao longo das almas e no caso antissimétrico através do esforço rasante originado pelo efeito de torção, levando a que a reação nos apoios seja nula. As Figuras 6.27 e 6.28 ilustram, o procedimento adotado.

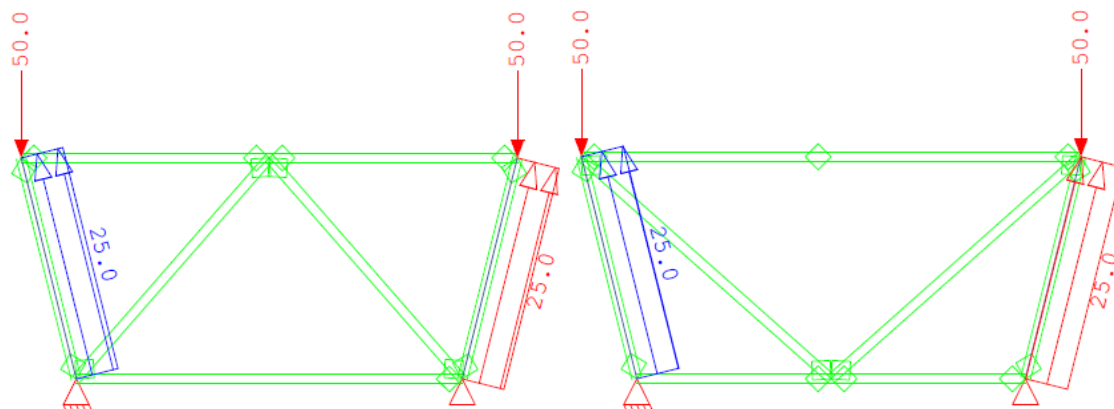


Figura 6.27 – Carregamento simétrico ($P = 50 \text{ kN}$) e simulação do efeito de difusão longitudinal das cargas.

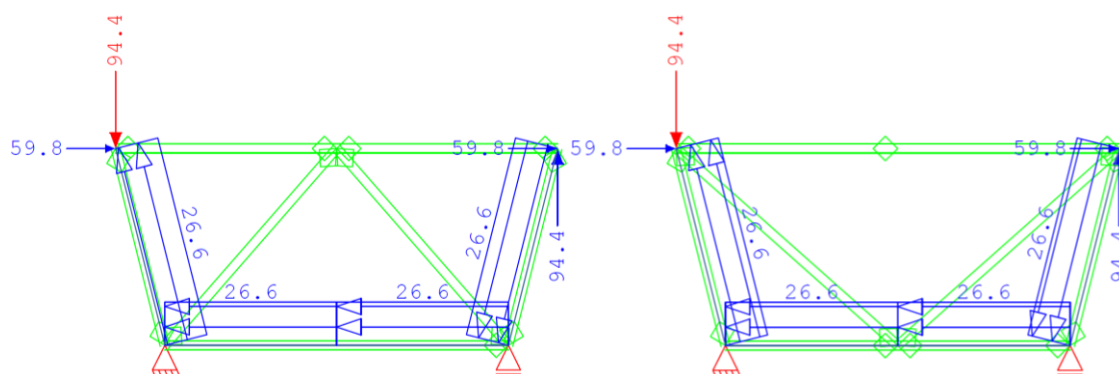


Figura 6.28 – Carregamento antissimétrico ($P' = 94,4 \text{ kN}$) e aplicação das cargas de esforço rasante

Note-se que no montante superior do caixão, o esforço rasante foi substituído por duas forças concentradas horizontais, correspondentes à resultante deste esforço repartido igualmente pelos dois banzos superiores. Proceder de outra forma seria irrealista, uma vez que o montante superior apenas se encontra conectado à laje na zona das banzos, pelo que o liberta do efeito do esforço rasante.

Posto isto, resta agora determinar a carga P a introduzir no modelo da secção transversal. Para isto, procedeu-se a uma análise em planta, por forma a conhecer a carga absorvida por uma treliça interna. Colocando cada um dos veículos de Fadiga na sua posição mais excêntrica, é possível conhecer a amplitude de difusão da carga até ao eixo do tabuleiro, determinando-se desta forma a carga vertical e momento torsor por metro, originando estes determinados esforços numa treliça interna em função do seu afastamento em planta. O procedimento de cálculo desenvolvido para determinar a carga absorvida por uma treliça interna encontra-se explicitado e ilustrado na Figura 6.29.

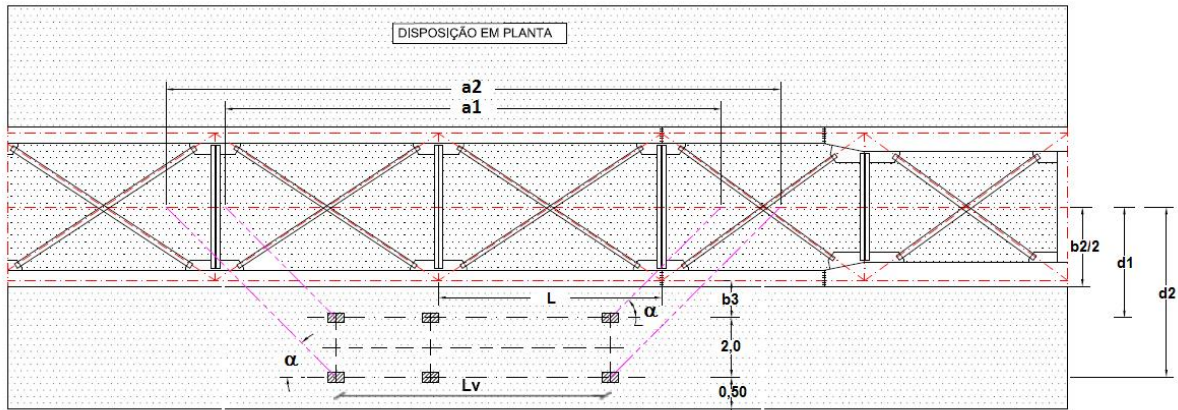


Figura 6.29 – Difusão em planta das cargas transmitidas pelos veículos

Conhecendo as características e dimensões do tabuleiro, e portanto os valores a atribuir às variáveis da Figura 6.29, procede-se ao cálculo do momento torsor, equação (6.3), assim como da carga vertical distribuída, equação (6.2), por metro de comprimento de tabuleiro,

$$q \left[\frac{kN}{m} \right] = \left[\frac{\sum P1}{Lv + 2 \times d1 \times \tan(\alpha)} + \frac{\sum P2}{Lv + 2 \times d2 \times \tan(\alpha)} \right] \quad (6.2)$$

$$t \left[\frac{kN.m}{m} \right] = \left[\frac{\sum P1 \times d1}{Lv + 2 \times d1 \times \tan(\alpha)} + \frac{\sum P2 \times d2}{Lv + 2 \times d2 \times \tan(\alpha)} \right] \quad (6.3)$$

Em que,

- P1 e P2 - corresponde ao valor da carga transmitida por cada roda do mesmo alinhamento longitudinal do veículo de fadiga;
- d1 e d2 - correspondem às distâncias do eixo de cada roda alinhadas segundo o mesmo alinhamento longitudinal, ao eixo do tabuleiro;
- Lv - corresponde ao comprimento total do veículo de fadiga;
- α – Corresponde ao ângulo de difusão das cargas, que usualmente toma o valor de 45 graus.

O momento torsor, assim como a carga vertical em cada treliça interna, é finalmente obtida mediante o produto dos valores resultantes de cada uma das equações, pelo afastamento longitudinal, L, entre cada treliça.

Conhecidos os valores de carga vertical e momento torsor absorvido por cada treliça interna, os esforços respeitantes a cada carregamento, simétrico e antissimétrico, são obtidos substituindo no modelo transversal o seu respetivo valor.

Finalmente, sendo conhecidos os esforços correspondentes à carga real aplicada em cada treliça, obtêm-se os esforços finais reais por sobreposição de efeitos somando os valores dos esforços do caso simétrico com o caso antissimétrico.

6.3 PORMENORES E CATEGORIAS DE PORMENOR

Nas Figuras 6.30, 6.31, 6.32, 6.33, e nas Tabelas 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7, encontram-se representados e classificados de acordo com as tabelas existentes na EN1993-1-9, todos os pormenores críticos mencionados aquando da descrição de cada uma das tipologias seccionais estudadas.

Entende-se por pormenor crítico todo e qualquer ponto onde se produza uma alteração de geometria de secção que implique ligações soldadas ou aparafusadas, ou qualquer outro ponto onde se produzam concentrações de tensões.

Assim sendo, os pontos que no caso da secção com travessa superior não escorada requerem um controlo mais detalhado são (Figura 6.30),

- Ligação do banzo superior da travessa transversal ao banzo longitudinal submetido a tensões normais (pormenor 1a).
- Ligação do banzo superior com a alma da travessa transversal analisada a tensões normais com possíveis furações (pormenor 1b).
- Ligação da banzo inferior da travessa à alma do caixão, submetida a tensões normais, (pormenor 2a).
- Ligação da alma da travessa superior ao banzo inferior, analisada a tensões normais com existência de possíveis furações, pormenor 2b.
- Ligação do conector de perno com o banzo superior da travessa, pormenor 3a (banzo superior afetado pela presença de conector de perno) e 3b (conector de perno).
- Ligação da alma da travessa à alma do caixão metálico, submetida a tensões tangenciais (pormenor 4).
- Análise global do banzo superior longitudinal do caixão, tendo em conta a repercussão local devido à união do banzo transversal.

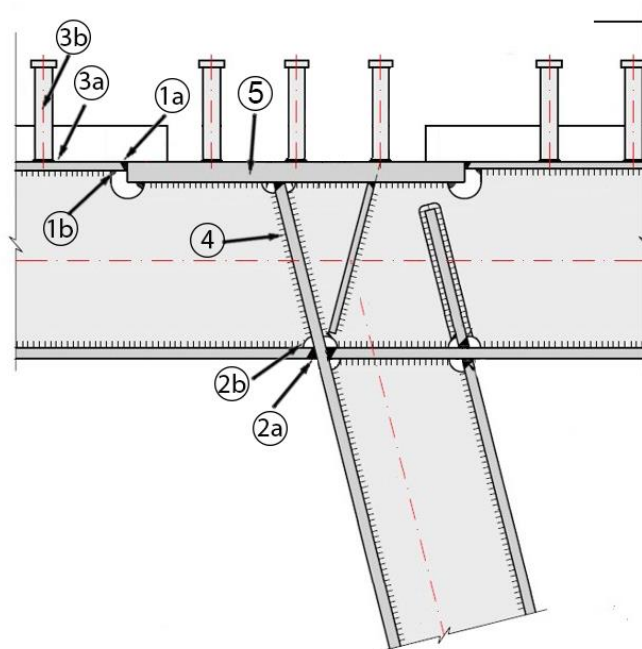


Figura 6.30 – Pormenores de ligação da travessa superior não escorada ao caixão metálico

Tabela 6.4 – Classificação dos pormenores de ligação de acordo com a EN1993-1-9

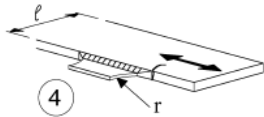
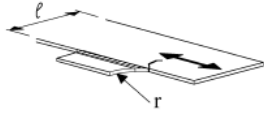
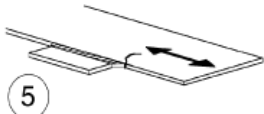
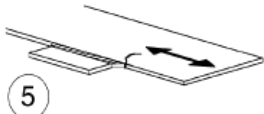
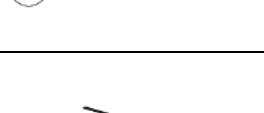
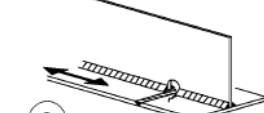
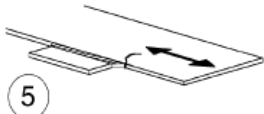
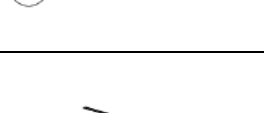
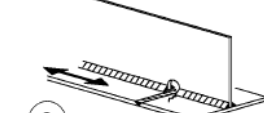
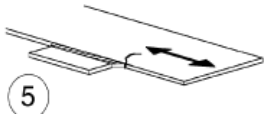
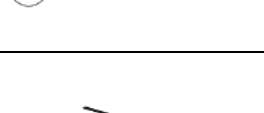
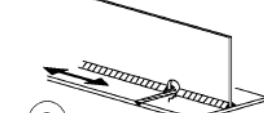
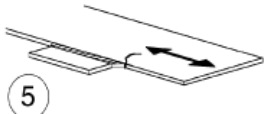
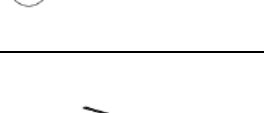
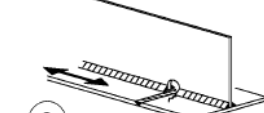
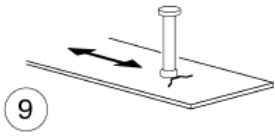
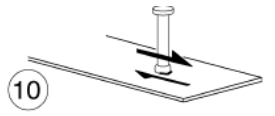
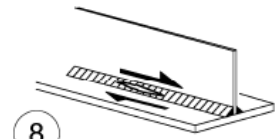
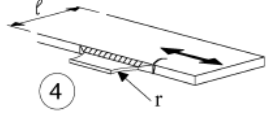
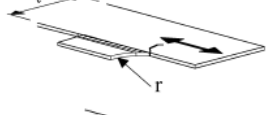
Detalhe	Pormenor EC3 - 1 - 9	Categoria de pormenor	Observações
1a	  	40	<p>Influência da transição de chapas.</p> <p>Pormenores 4 (a) e 5 (b) da tabela 8.4.</p> <p>As tensões normais são calculadas considerando secção fissurada.</p>
		a	
		90	
		(a)	
1b	  	40	<p>Pormenor 9 da tabela 8.2. pelo facto de existir uma furação na zona de intersecção dos cordões de soldadura. As tensões normais no banzo superior são calculadas considerando secção fissurada. Esta verificação pode ou não ser mais crítica do que a anterior.</p>
		a	
		90	
		(a)	
2a	  	80	<p>Pormenor 9 da tabela 8.2. pelo facto de existir uma furação na zona de intersecção dos cordões de soldadura. As tensões normais no banzo superior são calculadas considerando secção fissurada. Esta verificação pode ou não ser mais crítica do que a anterior.</p>
		a	
		90	
		(a)	
2b	  	80	<p>Pormenor 1 da tabela 8.5. Tomando L como a espessura da chapa de alma do caixão, que nesta tipologia não é usual ser superior a 50 mm.</p> <p>Novamente as tensões normais no banzo inferior são obtidas considerando secção fissurada.</p>
		a	
		90	
		(a)	
2b	  	80	<p>Pormenor 9 da Tabela 8.2. Influência da furação. As tensões normais no banzo inferior são calculadas considerando secção fissurada. Esta verificação é mas crítica que a 2a.</p>
		a	
		90	
		(a)	

Tabela 6.5 – Classificação dos pormenores de ligação de acordo com a EN1993-1-9

Detalhe	Pormenor EC3 -1-9	Categoria de pormenor	Observações
3a	 (g)	80	Pormenor 9 da Tabela 8.4. Influência da existência de conetor de perno. As tensões normais no banzo superior será calculada com propriedades de secção fissurada. Esta verificação pode ser menos crítica do que a 1a.
3b	 (h)	90	Pormenor 10 da Tabela 8.5. Dano no conetor de perno. Por coerência com a verdadeira resposta do elemento o esforço rasante nos pernos deveria calcular-se com as propriedades de secção fissurada.
4	 (i)	80	Pormenor 8 da tabela 8.5. Conservadoramente, a tensão tangencial pode calcular-se para a alma da secção alternativamente aos cordões de soldadura.
5	 (a)  (b)	40 a 90	Análise global. Pormenor 4 ou 5 da Tabela 8.4. Dano na banzo longitudinal

No caso da tipologia seccional com travessa superior escorada, os pormenores críticos são,

- Todos os pormenores referidos no caso da tipologia de travessa superior não escorada, Tabelas 6.4 e 6.5.
- Ligação de banzos inferiores da travessa, submetida a tensões normais, (pormenor 6).
- Ligação das escoras à chapa de Gusset de ligação à alma do caixão, submetida a tensões normais, (pormenor 7);

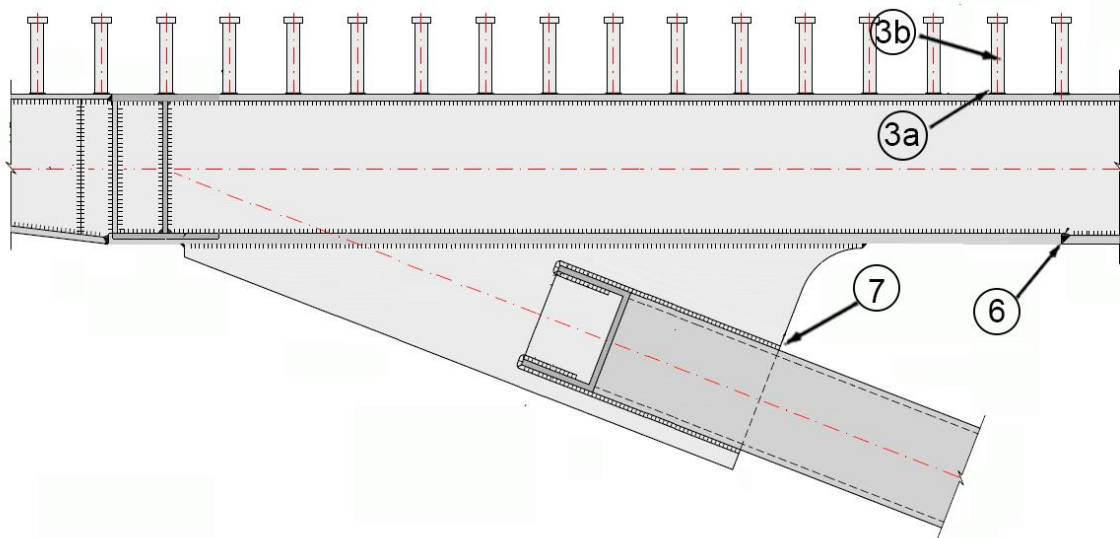


Figura 6.31 – Pormenores críticos na zona de ligação da escora à travessa superior

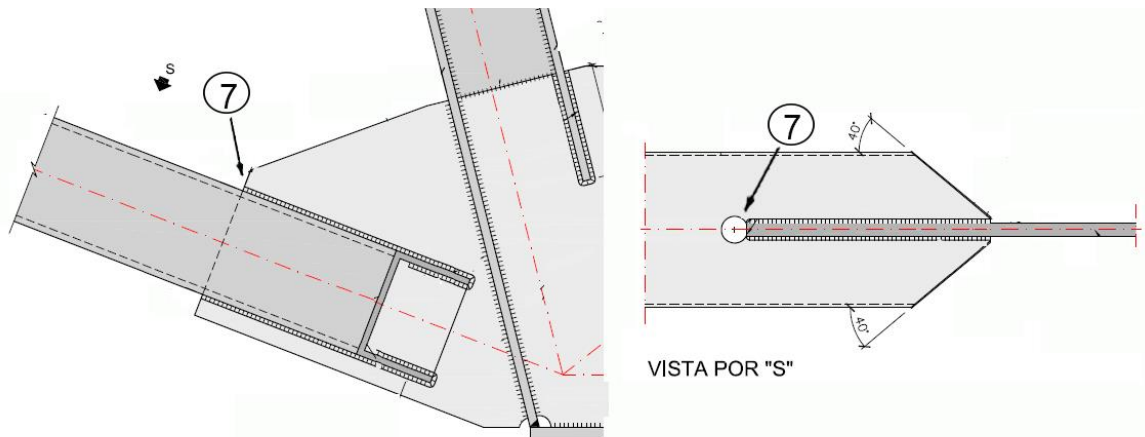


Figura 6.32 – Pormenor de ligação da escora metálica ao caixão e pormenor crítico

Tabela 6.6 – Classificação dos pormenores de ligação de acordo com a EN1993-1-9

Detalhe	Pormenor EC3-1- 9	Categoria pormenor	Observações
6	<p>(a)</p>	80	Pormenor 11 da Tabela 8.3. As Tensões normais serão calculadas tendo em conta secção bruta.
7	<p>(b)</p>	63 ou 71	Pormenor 2 da Tabela 8.6. Categoria depende do ângulo alfa, sendo 63 para ângulos superiores a 45 graus. As tensões normais calcular-se-ão para a escora.

Por fim, no caso da tipologia de tabuleiro sem travessa superior, os pormenores críticos alvos de um estudo detalhado à fadiga são os seguintes,

- Ligação entre os duplos perfis do montante superior/diagonal, (pormenor 8);
- Ligação das diagonais à chapa de Gusset, (pormenor 7);
- Ligação dos montantes superiores aos banzos superiores do caixão, (pormenor 1a).

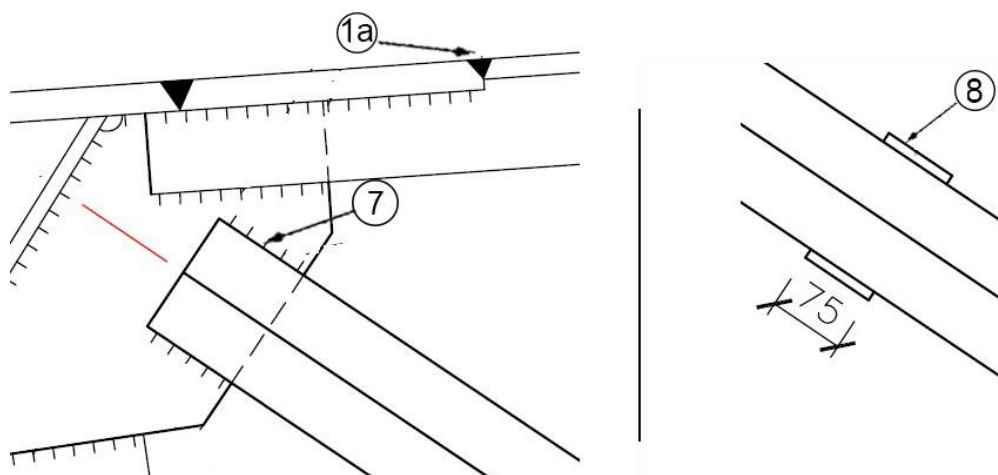
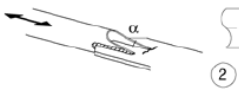
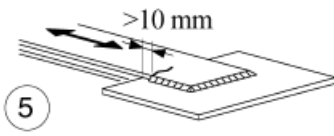


Figura 6.33 – Pormenor de ligação das diagonais à chapa de gusset (esquerda) e ligação entre perfis duplos (direita)

Tabela 6.7 – Classificação dos pormenores de ligação de acordo com a EN1993-1-9

Detalhe	Pormenor EC3 – 9	Categoria pormenor	Observações
7	 (b)	45 ou 80	Ver pormenor 7 ou pormenor 6
8	 (a)	45	Pormenor 5 da Tabela 8.5. As tensões normais serão obtidas para as chapas sobrepostas.

6.4 DIMENSIONAMENTO DE SECÇÕES DE ACORDO COM O EUROCÓDIGO

À semelhança do que fora já efetuado no Capítulo 5, também neste capítulo se procedeu ao reajuste das secções críticas, antes de qualquer análise à Fadiga, de acordo com as ações presentes no EC1-2.

É no entanto importante referir, que apenas se procedeu ao dimensionamento das secções das tipologias seccionas de travessa superior escorada e não escorada, uma vez que no caso das treliças internas existe uma grande variedade de adaptação e critérios ajustados a cada caso específico, pelo que a análise à fadiga no caso desta tipologia se centra num caso concreto de um projeto existente com secções já definidas.

De seguida explicitam-se os critérios usados para efetuar o dimensionamento referido, as cargas usadas para obtenção dos esforços em Estado Limite Último assim como tabelas-resumo das secções obtidas em cada caso.

6.4.1. TRAVESSA SUPERIOR NÃO ESCORADA

Por forma a determinar a secção de arranque de uma travessa superior não escorada, desenvolveu-se um modelo de uma consola em *SofiStik* (Figura 6.3), fixando a sua dimensão em 4,75 m (dimensão usual) de comprimento. Para além das cargas permanentes e restantes cargas permanentes foram aplicadas as sobrecargas rodoviárias respeitante ao *Load Model 1* da EN1991-2, posicionadas de forma a obter o momento fletor máximo no encastramento (zona de ligação ao caixão). A Tabela 6.8 resume a título de exemplo as cargas aplicadas numa travessa superior não escorada de 4,75 m de comprimento e 5 m de separação em planta.

Os valores usados e indicados na tabela para as cargas de peso próprio da secção metálica, assim como o peso próprio dos passeios e barreiras de segurança, constituem valores assumidos, provenientes da experiência da empresa de projeto IDEAM S.A., que são muito usuais nesta tipologia de pontes, podendo no entanto estes valores diferir em casos distintos.

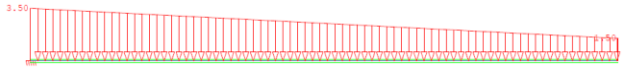
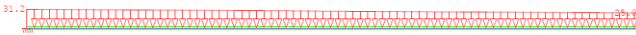

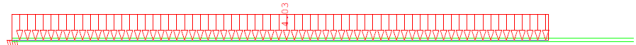
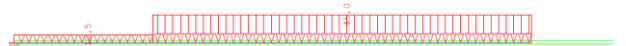
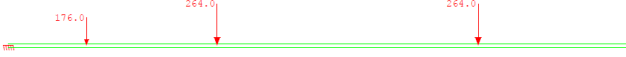
Denota-se também que a carga concentrada associada aos veículos pesados do *Load Model 1*, foi calculada repartindo isostaticamente a carga entre duas travessas consecutivas mediante a equação (6.4),

$$R_{Travessa} = Q_{Veículo} \times \left(2 - \frac{1,2}{L}\right) \quad (6.4)$$

Em que,

- $R_{Travessa}$ – reação total correspondente a um eixo do veículo pesado;
- L - representa o afastamento entre duas travessas consecutivas;
- $Q_{Veículo}$ - carga por eixo do veículo pesado;

Tabela 6.8 – Exemplo de cargas e sobrecargas aplicadas para travessas afastadas em planta de 5 m

Exemplo Cargas e Sobrecargas – Afastamento em planta 5 m	
<p>Peso Próprio Metal Estrutural</p>  <p>(a)</p>	<p>Peso próprio do metal variável uma vez que a secção se vai reduzindo ao longo da travessa, variando de 70 kg/m² na secção de encastramento a 30 kg/m² na secção de extremidade.</p> <p>No encastramento - $0,7 \text{ kN/m}^2 \times 5 \text{ m} = 3,5 \text{ kN/m}$</p> <p>Na extremidade - $0,30 \text{ kN/m}^2 \times 5 \text{ m} = 1,5 \text{ kN/m}$</p>
<p>Peso Próprio Laje</p>  <p>(b)</p>	<p>Peso próprio da laje variável uma vez que a espessura se vai reduzindo ao longo da travessa, variando de 25cm na secção de encastramento a 20cm na secção de extremidade.</p> <p>No encastramento - $25 \text{ kN/m}^3 \times 0,25 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 31,2 \text{ kN/m}$</p> <p>Na extremidade - $25 \text{ kN/m}^3 \times 0,20 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 25,0 \text{ kN/m}$</p>
<p>Restantes Cargas Permanentes (c) e Sobrecarga de pavimento (d)</p>  <p>(c)</p>  <p>(d)</p>	<p>Pavimento - $23 \text{ kN/m}^3 \times 0,07 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 8,05 \text{ kN/m}$</p> <p>Carga passeio - $9,6 \text{ kN/m}^2 \times 0,65 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 31,2 \text{ kN/m}$</p> <p>Carga barreira - $2 \text{ kN/m} \times 5 \text{ m} = 10 \text{ kN}$</p> <p>Incremento de pavimento - $23 \text{ kN/m}^3 \times 0,035 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 4,03 \text{ kN/m}$</p>
<p>Sobrecarga Distribuída</p>  <p>(e)</p>	<p>Notional Lane 1 - $9 \text{ kN/m}^2 \times 5 \text{ m} = 45 \text{ kN/m}$</p> <p>Notional Lane 2 - $2,5 \text{ kN/m}^2 \times 5 \text{ m} = 12,5 \text{ kN/m}$</p>
<p>Sobrecarga Veículo Pesado</p>  <p>(f)</p>	<p>Notional Lane 1 - $\frac{300 \text{ kN} \times \left(2 - \frac{1,2}{5}\right)}{2} = 264 \text{ kN/roda}$</p> <p>Notional Lane 2 - $\frac{200 \text{ kN} \times \left(2 - \frac{1,2}{5}\right)}{2} = 176 \text{ kN/roda}$</p>
V_{Ed} [kN]	1455
M_{Ed} [kN.m]	-3248

Conhecidos os esforços, procede-se ao dimensionamento em ELU, excluindo Fadiga, e ELS de acordo com EN1993/4, tendo em conta os seguintes critérios de dimensionamento,

- Determinação da altura da secção metálica tendo em conta a resistência ao esforço transversal da alma e tendo em conta que este valor se aproxima usualmente de $L_{Travessa}/10$;
- Determinação da largura e espessura do banzo inferior tendo em conta a atribuição de classificação de classe 2 ou 1 a este elemento;
- Cálculo da largura efetiva da laje de betão armado tendo em conta as disposições da EN1992-1;
- Determinação das dimensões da chapa de banzo superior assumindo uma quantidade razoável de armadura passiva;
- Cálculo da quantidade de conectores de pernos a dispor na travessa segundo as disposições da EN1994.

As características das secções de encastramento, numa travessa superior não escorada de 4,75m de comprimento, resultantes do dimensionamento estrito em ELU e ELS, em função do afastamento em planta de duas travessas consecutivas, encontram-se detalhadas na Tabela 6.9.

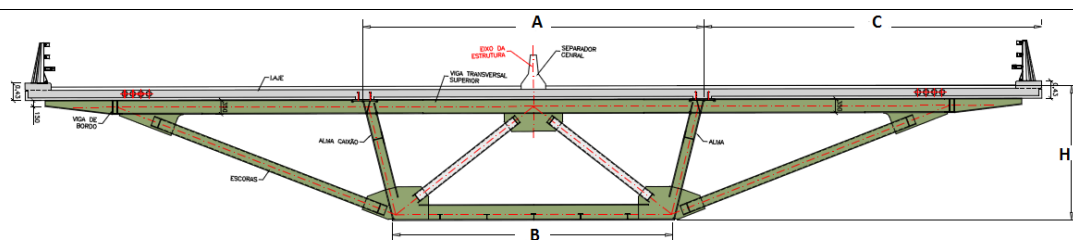
Tabela 6.9 – Características da secção de encastramento da travessa superior não escorada em função do afastamento em planta entre travessas consecutivas

Afastamento (m)	M_{Ed} (m·kN)	V_{Ed} (kN)	H_{Metal} (mm)	Plat.Sup.	Alma	Plat. Inf.	Armadura	Conectores
4	-2936	1325	400	≠250x15	≠20	≠470x35	Ø20/0,10 + Ø16/0,20	2Ø22/0,15
5	-3248	1455	420			≠540x35		
6	-3537	1575	440			≠550x35		
8	-4081	1797	500			≠580x35		

6.4.2. TRAVESSA SUPERIOR ESCORADA

No caso da tipologia de tabuleiro com 4 vias de circulação, ou seja a secção em caixão com travessa superior escorada, procedeu-se ao dimensionamento de forma estrita em Estado Limite Último, excluindo fadiga, e Serviço das três secções críticas já mencionadas, a secção de ligação ao caixão metálico, a secção de flexão positiva da travessa e a escora metálica. No presente estudo, analisou-se uma secção com dimensões concretas, fixando a altura e largura inferior do caixão metálico em 2,65m e 6,85m respetivamente, assim como uma largura total de tabuleiro de 24,30m tendo em conta que o ponto de apoio da escora se situa a 1,8m do bordo deste. Na Tabela 6.10, apresentam-se as características da secção transversal com as respetivas dimensões,

Tabela 6.10 – Dimensões dos elementos principais da secção em caixão com travessa superior escorada



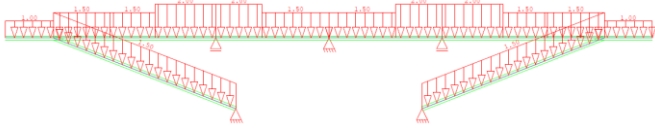
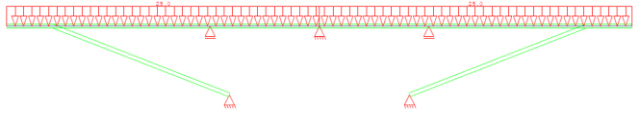
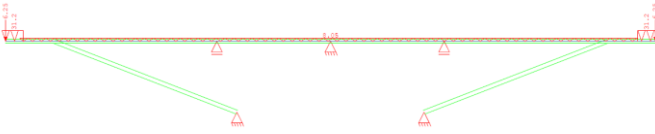
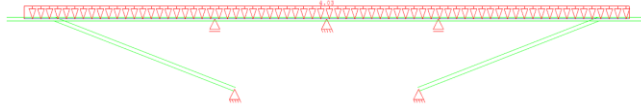


Secção em caixão com travessa superior escorada	
A – Largura superior do caixão	8,5 m
B – Largura inferior do caixão	6,85 m
C – Comprimento da travessa	7,9 m
H – Altura total da seção	2,65 m + 0,25 m
$L_{\text{Total Tabuleiro}} = A + 2C$	24,30 m

Novamente, resumem-se a título de exemplo as cargas aplicadas no modelo de cálculo com as dimensões acima mencionadas, e um afastamento em planta entre travessas consecutivas de 5m.

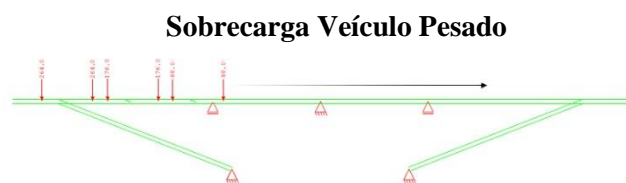
A respeito da modelação das cargas do *Load Model 1*, procedeu-se a um “passeio” transversal das cargas de veículos pesados ao longo de toda a largura do tabuleiro, realizando várias combinações de sequência dos veículos, por forma a cobrir todas as hipóteses de solicitação da estrutura. A carga respeitante a cada eixo de veículo pesado entre cada travessa em planta foi obtida de acordo com o procedimento mencionado no caso da tipologia anterior, mediante o uso da equação (6.4). Também a carga distribuída constituinte do *Load Model 1*, foi aplicada se forma sequencial por forma a obter a envolvente de esforços em todas as secções, resultantes da aplicação tanto da carga distribuída como dos veículos pesados.

Refere-se novamente que os valores usados e indicados na tabela para as cargas de peso próprio da secção metálica, assim como o peso próprio dos passeios e barreiras de segurança, constituem valores assumidos, provenientes da experiência da empresa de projeto IDEAM S.A., que são muito usuais nesta tipologia de pontes, podendo no entanto estes valores diferir em casos distintos.

Tabela 6.11 – Exemplo de cargas e sobrecargas aplicadas para travessas afastadas em planta de 5 m

Exemplo Cargas e Sobrecargas – Afastamento em planta 5m	
<p>Peso Próprio Metal Estrutural</p>  <p>(a)</p>	<p>Peso próprio do metal variável uma vez que a secção se vai reduzindo ao longo da travessa, tomando o valor de 20 kg/m² na bordo, 30 kg/m² a meio da travessa e 40 kg/m² nas imediações da zona de ligação à alma do caixão. As escoras tomam o valor de 30 kg/m²</p> <hr/> <p>No bordo - $0,2kN/m^2 \times 5m = 1,0kN/m$</p> <p>Centro da travessa - $0,30kN/m^2 \times 5m = 1,5kN/m$</p> <p>Zona de ligação - $0,40kN/m^2 \times 5m = 2,0kN/m$</p> <p>Escoras - $0,30kN/m^2 \times 5m = 1,5kN/m$</p>
<p>Peso Próprio Laje</p>  <p>(b)</p>	<p>Peso próprio da constante assumindo uma espessura de 20cm.</p> <hr/> <p>P.P. Laje - $25kN/m^3 \times 0,20m \times 5m = 25kN/m$</p>
<p>Restantes Cargas Permanentes (c) e Sobrecarga de pavimento (d)</p>  <p>(c)</p>  <p>(d)</p>	<p>Pavimento - $23kN/m^3 \times 0,07m \times 5m = 8,05kN/m$</p> <p>Carga passeio- $9,6kN/m^2 \times 0,65m \times 5m = 31,2kN/m$</p> <p>Carga barreira - $1,25kN/m \times 5m = 10kN$</p> <p>Incremento de pavimento - $23kN/m^3 \times 0,035m \times 5m = 4,03kN/m$</p>
<p>Sobrecarga Distribuída</p>  <p>(e)</p>  <p>(f)</p>	<p>Sobrecarga distribuída de 2,5 kN/m² aplicada sequencialmente sobre cada barra ao longo do tabuleiro. Sobrecarga distribuída de 6,5 kN/m² de 3m de largura aplicada sequencialmente por forma a perfazer os 9 kN/m² respeitantes à Lane mais condicionante.</p> <hr/> <p>Sobrecarga distr. 1 - $2,5kN/m^2 \times 5m = 12,5kN/m$</p> <p>Sobrecarga distr. 2 - $6,5kN/m^2 \times 5m = 32,5kN/m$</p>

Exemplo Cargas e Sobrecargas – Afastamento em planta 5m



(g)

$$\text{Notional Lane 1} - \frac{300 \text{ kN} \times \left(2 - \frac{1.2}{5}\right)}{2} = 264 \text{ kN/roda}$$

$$\text{Notional Lane 2} - \frac{200 \text{ kN} \times (2 - \frac{1.2}{5})}{2} = 176 \text{ kN/roda}$$

$$\text{Notional Lane 3} - \frac{100 \text{ kN} \times \left(2 - \frac{1,2}{5}\right)}{2} = 88 \text{ kN/roda}$$

Ligação ao caixão	N_{Ed} [kN]	V_{Ed} [kN]	M_{Ed}⁻ [kN.m]
	+3170	1516	-1546
Zona central da travessa	N_{Ed} [kN]	V_{Ed} [kN]	M_{Ed}⁺ [kN.m]
	+3170	288	+1152
Escora	N_{Ed} [kN]	V_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kN.m]
	-3401	5,2	-0,7

Sendo conhecidos os esforços em cada uma das secções de estudo, procede-se ao dimensionamento das mesmas. No caso da secção de ligação ao caixão e secção da zona central da travessa adotou-se para a primeira, o procedimento mencionado na tipologia anterior, e para a segunda, o procedimento explicitado em 5.4.

No caso das escoras foi adotado o seguinte procedimento de cálculo,

- Determinação de uma área inicial tendo em conta a encurvadura do elemento mediante a expressão (6.5), assumindo um coeficiente de redução χ .

$$N_{b,Rd} = \frac{X \times A \times f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.5)$$

- Cálculo do novo coeficiente de redução, χ , e determinação de uma nova área.
- Repetir os dois primeiros passos até obter um valor estabilizado de χ .

Assim, as características das secções resultantes do dimensionamento acima referido encontram-se resumidas nas Tabelas 6.12, 6.13 e 6.14 em função do afastamento em planta entre travessas consecutivas.

Tabela 6.12 - Características da secção de ligação da travessa superior escorada ao caixão em função do afastamento em planta entre travessas consecutivas

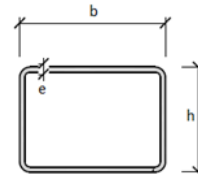
Afastamento (m)	H _{Metal} (mm)	Plat. sup.	Alma	Plat. Inf.	Armadura	Conectores
4	360	≠250x15	≠20	≠340x20	Ø20/0,10	2Ø22/0,15
5	500	≠250x20	≠20	≠410x25	Ø25/0,10	
6	500	≠250x20	≠20	≠420x25	Ø25/0,10	
8	625	≠250x20	≠15	≠420x25	Ø25/0,10	

Tabela 6.13 - Características da secção central da travessa superior escorada em função do afastamento em planta entre travessas consecutivas

Afastamento (m)	H _{Metal} (mm)	Plat. sup.	Alma	Plat. Inf.	Armadura	Conetores
4	360	≠300x20	≠15	≠420x25	Ø12/0,10	2Ø22/0,20
5	500	≠250x10	≠10	≠410x25	Ø12/0,10	
6	500	≠250x10	≠10	≠420x25	Ø12/0,10	
8	625	≠250x10	≠10	≠420x25	Ø12/0,10	

Tabela 6.14 - Características das escoras metálicas em função do afastamento em planta entre travessas consecutivas

Afastamento (m)	Secção tubular quadrada
4	h=b=350 mm; e=15 mm
5	h=b=400 mm; e=15 mm
6	h=b=400 mm; e=15 mm
8	h=b=450 mm; e=15 mm



6.4.3. TRELIÇA INTERIOR

Como se referiu inicialmente na presente secção, pelas razões mencionadas, no caso da tipologia de secção em caixão sem travessa superior, procedeu-se à análise à fadiga de um caso concreto de uma treliça, tipo W e M, partindo de secções previamente existentes.

O caso analisado centrou-se numa secção transversal, cujo caixão metálico apresenta 3,5m e 4,5m de largura na zona inferior e superior respetivamente e 2,5m de altura, sendo o afastamento em planta fixado nos 5m (valor mais usual), apresentando-se na Tabela 6.15 as secções que materializam as diagonais das treliças internas e os montantes superiores.

Tabela 6.15 – Características seccionais de uma treliça tipo W e M com altura de 2,5m e 5 m de afastamento em planta

Afastamento em planta – 5m	
	S1
	b[mm] 70
	h[mm] 70
	e[mm] 7
	S2
	b[mm] 80
	h[mm] 80
	e[mm] 8

6.5 ANÁLISE À FADIGA

6.5.1. CONSIDERAÇÕES E CRITÉRIOS DE ANÁLISE À FADIGA

Estando agora definidas, em cada caso, as secções críticas e ligações a analisar, bem como as dimensões e propriedades mecânicas de cada uma, procede-se a análise à fadiga dos elementos mencionados segundo as seguintes considerações.

Para se concretizar o processo de análise à fadiga dos pormenores referidos em 5.2.1.4, usou-se o método do Dano Acumulado em conjunto com a aplicação do veículo de fadiga FLM4. Como já referido no Capítulo 4, o uso deste modelo de carga é o mais adequado sob a ótica de análise do Método do Dano Acumulado, uma vez que o veículo de fadiga FLM3 é apenas recomendado em análises longitudinais e centradas no Método Simplificado do EC3-2, já que constitui um veículo muito pesado e concentrado, o que conduziria a resultados irrealistas na análise local levada a cabo nesta secção. Para além disso, o uso do veículo FLM4 permite simular diferentes configurações de tráfego cuja distribuição de cada veículo pesado-tipo, varia em função da tipologia de estrada (tráfego local, média distância ou longa distância), tal como se viu no capítulo 5.

O procedimento de cálculo relativo ao Método do Dano Acumulado, coincide com o procedimento já usado e detalhado no Capítulo 5, aquando da análise global à fadiga de pontes mistas rodoviárias (5.5.3.1), pelo que apenas se alargou o procedimento às diferentes fibras de controlo em cada caso.

Posto isto, listam-se abaixo as considerações tidas em conta nos cálculos usados mediante a aplicação deste método,

- Os espectros de esforços foram obtidos para o modelo de carga FLM4.
- A análise à Fadiga através deste método encontra-se, à semelhança do capítulo anterior, ao abrigo da abordagem de “Tempo de Vida garantida” em conjunto com o coeficiente de risco de 1,35, exceto no caso das treliças internas que pelo facto de não conduzirem ao colapso da estrutura se usou o coeficiente de risco 1,15.
- A vida útil fixou-se no período de 100 anos tal como indicado na EN1990 – (2.3) para as estruturas de pontes.
- Procede-se ao cálculo do dano, provocado por cada veículo-tipo do modelo FLM4, para cada intensidade média diária de tráfego (Tabela 4.1) e para cada distribuição, em função da tipologia de estrada, de tráfego do modelo FLM4.
- O estudo foca-se apenas nas ligações mencionadas nas Tabelas 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7, com o propósito de analisar o dano resultante de cada solicitação nas secções obtidas através do processo de dimensionamento descrito em 6.4.
- O cálculo de tensões nos pormenores de ligação será efetuado de acordo com os critérios explicitados de seguida em 6.5.2.
- Não se procedeu ao estudo de interação de dano entre a banzo superior e conector de perno, já que não parecem existir regras claras a este respeito quando se recorre a análises através do Método do Dano Acumulado.
- O dano total foi obtido através da regra de dano linear de Palmgren-Miner, com base nos pressupostos que lhe são inerentes (ver 3.2).

6.5.2. CÁLCULO DE TENSÕES

6.5.2.1 Propriedades mecânicas das secções

As características mecânicas de cada secção transversal foram calculadas de acordo com os procedimentos habituais de cálculo de área, momento estático e inércia (Figura 6.34). É importante referir que para a obtenção das características mecânicas da secção mista, foi usado um coeficiente de homogeneização igual a 7, pelo facto das ações rodoviárias dos veículos de fadiga constituírem solicitações instantâneas.

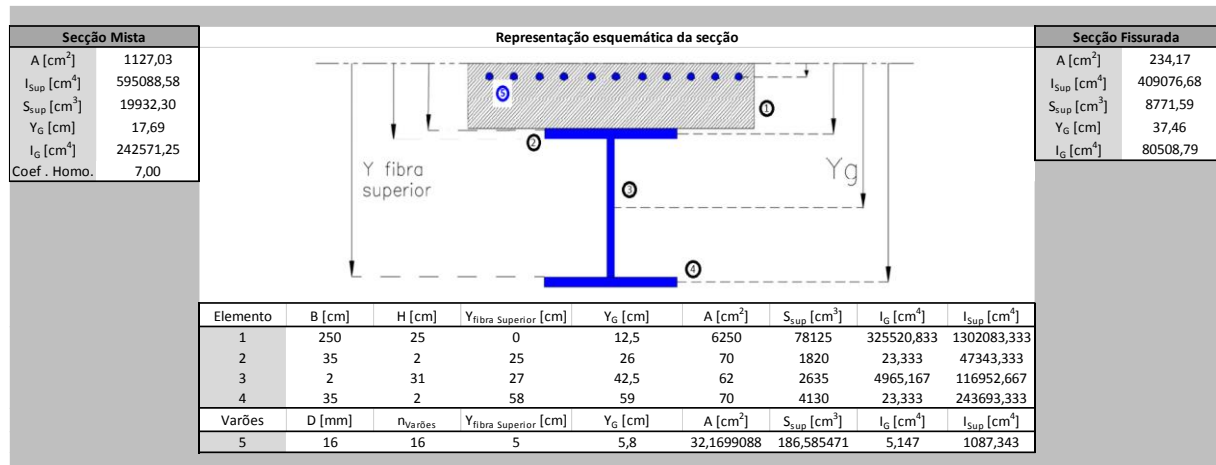


Figura 6.34 – Folha de cálculo em Excel desenvolvida para o cálculo de propriedades mecânicas

Para efeitos de cálculo do número de varões de armadura de flexão transversal da laje, recorreu-se à definição de banzo efetivo presente na EN1992-1 (5.3.2.1), determinando assim a largura de laje efetiva e a armadura passiva de flexão, que realmente contribui para as características mecânicas da mesma.

6.5.2.2 Tensões normais

Para o cálculo das tensões normais foi usada a fórmula clássica de Resistência de Materiais (equação (6.6)), usando a inércia e a distância à fibra de controlo correspondente a cada caso.

$$\sigma = \frac{M_{flector}}{I_{Secção\ Mista/Fissurada}} \times y_{fibra\ controlo} + \frac{N}{A} \quad (6.6)$$

Respetivamente às características mecânicas da secção, estas foram obtidas em função do esforço de flexão predominante, em cada caso estudado, por exemplo o uso de características de secção fissurada para a secção de ligação da travessa superior escorada à alma do caixão, e secção bruta para a secção de flexão positiva da mesma.

No caso da tipologia de secção com travessa superior escorada, e tendo em vista a obtenção da máxima tensão normal, procedeu-se ao uso de duas combinações de esforços,

- Momento fletor máximo e esforço axial concomitante;
- Esforço axial máximo e momento fletor concomitante;

É também importante referir que o efeito total do esforço axial com momento fletor foi obtido mediante a soma do efeito provocado por cada um dos esforços com o seu sinal correto, já que somar os dois efeitos em módulo conduziria a valores de tensões demasiado conservativos.

6.5.2.3 Tensões tangenciais

As tensões tangenciais na alma da secção, ou seja a tensão transmitida aos cordões de soldadura foram calculadas mediante a equação (6.7). Por ser conservativo, considerou-se apenas como área resistente ao corte a área da alma da secção, como se encontra esquematizado na Figura 6.35.

$$\tau = \frac{V_{actante}}{A_{alma}} \quad (6.7)$$

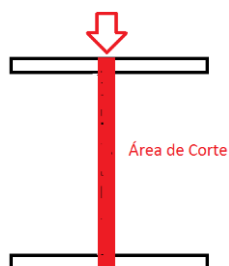


Figura 6.35 – Esquema da área de corte usada para cálculo de tensões tangenciais

No que toca às tensões tangenciais atuantes nos pernos de ligação, procedeu-se ao cálculo destas através da fórmula clássica de Colignon (equação (6.8)).

$$\tau = \frac{V_{actante} \times S_{Laje+Armadura}}{I_{Secção\ mista} \times t} \quad (6.8)$$

Sendo o esforço rasante por metro dado pela expressão (6.9),

$$r = \frac{V_{actante} \times S_{Laje+Armadura}}{I_{Secção\ mista}} \quad (6.9)$$

E finalmente dividindo pela área de pernos por metro, obtêm-se as tensões tangenciais num perno, através da expressão (6.10).

$$\tau_{perno} = \frac{r_{kN/m}}{A_{perno/m}} \quad (6.10)$$

É importante referir que, para o cálculo destas tensões se consideraram as propriedades mecânicas associadas a cada caso. No caso de flexão predominantemente negativa foram usadas propriedades de secção fissurada, e no caso de flexão predominantemente positiva constantes de secção bruta.

6.5.3. SECÇÃO EM CAIXÃO COM TRAVESSA SUPERIOR NÃO ESCORADA

Nesta secção apresentar-se-á um exemplo numérico de cálculo detalhado, para uma travessa superior não escorada de 4,75 m de comprimento e espaçamento em planta entre travessas consecutivas de 5 m. Para além do exemplo referido, os cálculos serão alargados a diferentes afastamentos em planta assim como diferentes intensidades de solicitação.

Tal como já referido, a análise à fadiga aqui exposta centrar-se-á no Método do Dano Acumulado supondo a utilização do modelo de carga FLM4 e quatro intensidades médias diárias, 0,05, 0,125, 0,5 e 2 milhões de veículos pesados por ano (Tabela 4.1), analogamente ao que já fora efetuado no Capítulo 5.

Refere-se também que os resultados serão organizados da seguinte forma,

- Cálculo da categoria ótima, ou seja a categoria que garante o tempo de vida útil previsto e que corresponde ao dano unitário, cumprindo o Estado Limite Último de Fadiga, no caso dos pormenores cuja categoria dependa de fatores de execução. Ou seja, os pormenores 1a, 1b, 2a, 2b e 4, possuem categoria variável dependendo das condições de execução sendo a categoria máxima destes pormenores, 90 (supondo que não existe furação e é feita uma transição circular suave entre chapas), 80, 80 (admitindo que não existe furação) respetivamente, assinalando-se a vermelho os casos de solicitação em que esta categoria máxima é ultrapassada.
- Cálculo do dano no caso de pormenores com categoria bem definida. Neste caso os pormenores 3a, e 3b possuem categoria 80 e 90 respetivamente, avaliando-se o dano provocado pelas diferentes intensidades de tráfego nas secções resultantes do dimensionamento em Estado Limite Último e Serviço.

Posto isto, procede-se à simulação da passagem dos diferentes veículos pesados-tipo do modelo FLM4, no modelo de barras simplesmente apoiadas (Figura 6.8) por forma a obter a reação máxima numa travessa, admitindo um afastamento de 5 m. Os valores das reações máximas obtidas encontram-se na Tabela 6.16,

Tabela 6.16 – Reação máxima na travessa resultante da passagem dos diferentes veículos pesados do FLM4

Veículo	Peso total (kN)	R_{max} (kN), afastamento 5 m
FLM4 (a)	200	135,3
FLM4 (b)	310	219,9
FLM4 (c)	490	222,9
FLM4 (d)	390	162,1
FLM4 (e)	450	157,5

Conhecida a reação máxima por veículo na travessa crítica, procede-se ao cálculo do momento fletor na ligação ao caixão metálico, assumindo as distâncias representadas na Figura 6.36.

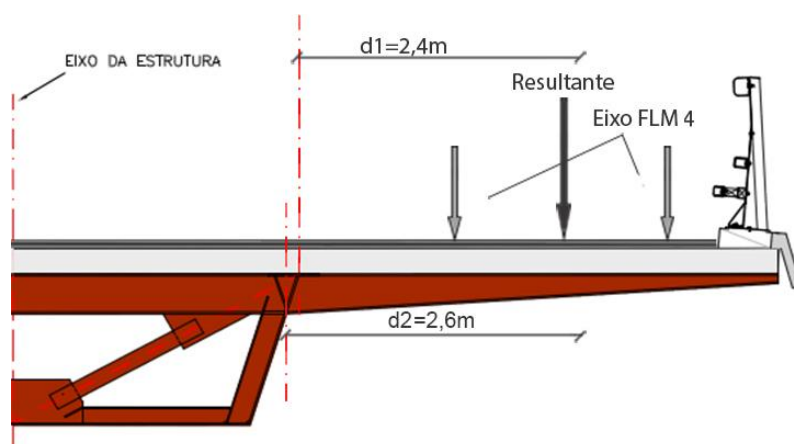


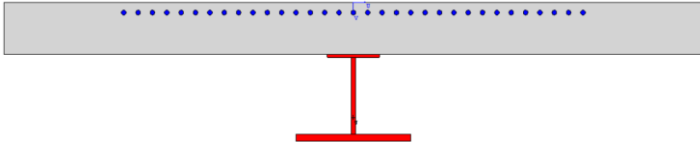
Figura 6.36 – Momento gerado pela resultante dos diferentes veículos do modelo FLM4

Assumindo uma distância de 2,4 m e 2,6 m, procede-se ao cálculo do momento fletor gerado pela reação obtida anteriormente, na zona do banzo superior e inferior respetivamente.

Note-se que, contrariamente aos casos de análise longitudinal, a passagem do veículo de Fadiga gera apenas um pico de momento fletor e não uma oscilação ao longo do tabuleiro, pelo fato de a análise se centrar num elemento local em que cada travessa constitui um caso isolado.

Conhecendo as características seccionais de zona de ligação da travessa ao caixão metálica, procede-se ao cálculo da oscilação tensional gerada em cada fibra de controlo, usando o procedimento descrito em 6.5.2., correspondente ao pormenor que se pretende analisar. As características seccionais respeitantes a uma travessa superior de 4,75 m de comprimento e 5m de afastamento em planta entre travessas consecutivas encontram-se na Tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Características seccionais da secção de encastramento de uma travessa superior não escorada com 4,75 m de comprimento e 5 m de afastamento em planta

Travessa superior – 4,75m [5m afastamento]			
Propriedades Mecânicas			
			
Elemento	B [cm]		H [cm]
Laje	336		25
Armadura	33 ϕ 23 (ϕ 20/0,10+ ϕ 16/0,20)		
Banzo. Sup.	25		1,5
Alma	2		37
Banzo. Inf.	54		3,5
Conectores de perno	2 ϕ 22/0,15		
Secção Fissurada	A [cm ²]	Y _G [cm]	I _g [cm ⁴]
	437,61	39,92	295749,34

1 - Cálculo do dano na ligação do banzo inferior com a alma do caixão metálico (Exemplo)

Tomando a categoria de pormenor 71, correspondente ao pormenor 2b, procede-se ao cálculo dos valores característicos da curva S-N (Figura 5.33), seguindo o procedimento explicitado no Capítulo 5. Assim,

$$\Delta\sigma_c = 71 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_D = 0.7368 \cdot \left(\frac{71}{1,35} \right) = 38,75 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_L = 0.5493 \times 38,75 = 21,28 \text{ MPa}$$

Sendo conhecida a curva S-N correspondente à categoria de pormenor 71, procede-se ao cálculo do dano infligido por cada veículo pesado-tipo do modelo FLM4 tendo em conta a zona da curva em que se encontra a oscilação tensional solicitante (equações (5.18)(5.19)(5.20)). A Tabela 6.18 resume as oscilações de tensão provocadas por cada veículo tipo na fibra de controlo do banzo inferior.

Tabela 6.18 – Oscilações de tensões provocadas por cada veículo de fadiga

Banzo inferior – Alma caixaão	
$\Delta\sigma[\text{FLM4-a)]}$	28,04 MPa
$\Delta\sigma[\text{FLM4-b)]}$	45,58 MPa
$\Delta\sigma[\text{FLM4-c)]}$	46,20 MPa
$\Delta\sigma[\text{FLM4-d)]}$	33,60 MPa
$\Delta\sigma[\text{FLM4-e)]}$	32,64 MPa

Posto isto, assumindo a configuração de larga distância do veículo FLM4 e uma intensidade média diária de 2,0 milhões de veículos pesado por ano, apresentam-se na Tabela 6.19 o número de ciclos totais aplicados por cada veículo tipo do modelo FLM4.

Tabela 6.19 – Ciclos atuantes de cada veículo tipo do modelo FLM4 assumindo a configuração de longa distância e uma IMD de 2 milhões de veículos pesados por ano

FLM4 – Configuração longa distância		Vida útil = 100 anos
Veículo	% de veículo tipo	Total VP – milhões
FLM4-a) – 200 kN	20	40
FLM4-b) – 310 kN	5	10
FLM4-c) – 490 kN	50	100
FLM4-d) – 390 kN	15	30
FLM4-e) – 450 kN	10	20

Assim, tomando como exemplo de cálculo o veículo pesado-tipo c), o dano provocado pelo mesmo é obtido da seguinte forma,

$$\Delta\sigma[\text{FLM4} - \text{c)]} = 46,20 \text{ MPa} \rightarrow 46,20 > \Delta\sigma_D$$

Pelo que,

$$N_S = 100 \cdot 10^6 \text{ ciclos}$$

e,

$$N_R = \frac{\left(\frac{\Delta\sigma_C}{1,35}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6}{\Delta\sigma_{FLM}^3} = \frac{\left(\frac{71}{1,35}\right)^3 \times 2 \cdot 10^6}{46,20^3} = 2,95 \cdot 10^6 \text{ ciclos}$$

Finalmente, o dano provocado por esta oscilação é dado por,

$$D = \frac{N_S}{N_R} \leftrightarrow \frac{100 \cdot 10^6}{2,95 \cdot 10^6} \leftrightarrow 33,89$$

Efetuada o mesmo cálculo para as restantes solicitações, o dano total é dado por,

$$D = \frac{N_{S1}}{N_{R1}} + \frac{N_{S2}}{N_{R2}} + \frac{N_{S3}}{N_{R3}} + \frac{N_{S4}}{N_{R4}} + \frac{N_{S5}}{N_{R5}} = \frac{40 \cdot 10^6}{25,19 \cdot 10^6} + \frac{10 \cdot 10^6}{3,07 \cdot 10^6} + \frac{100 \cdot 10^6}{2,95 \cdot 10^6} + \frac{30 \cdot 10^6}{10,21 \cdot 10^6} + \frac{20 \cdot 10^6}{11,79 \cdot 10^6} = 43,37$$

Por forma a determinar a categoria que conduziria a um dano unitário, ou seja a categoria ótima, desenvolveu-se uma folha de cálculo em Excel por forma a agilizar o processo de obtenção de dano, procedendo-se à determinação da categoria que conduziria ao dano unitário de forma iterativa, alterando sequencialmente a categoria de pormenor da ligação até se atingir um dano unitário.

2 - Cálculo do dano da ligação da alma da travessa à alma do caixão metálico (Exemplo)

A título de exemplo numérico, procede-se ao cálculo do dano provocado pelas tensões tangenciais na soldadura de ligação da alma da travessa à alma do caixão metálico. Este procedimento é em tudo análogo ao procedimento anterior, à exceção da alteração da curva S-N. Assim recuperando a informação do Capítulo 3 e sabendo a categoria de pormenor, $\Delta\tau_c$, o número de ciclos resistentes é calculado dependendo do tramo em que se localiza o intervalo de tensão solicitante,

Se $\Delta\tau_{FLM} \geq \Delta\tau_L$

$$N_R = \frac{\Delta\tau_c^5 \cdot 2 \cdot 10^6}{\Delta\tau_{FLM}^5} \quad (6.11)$$

Se $\Delta\tau_{FLM} \leq \Delta\tau_L$

$$N_R \cong \infty \quad (6.12)$$

Sabendo que a categoria de pormenor associado ao pormenor 4, é de 80, o valor que marca o limite de truncatura é dado por,

$$\Delta\tau_L = \left(\frac{80}{1.35}\right) \cdot \left(\frac{2}{100}\right)^{1/5} = 27,1 \text{ MPa}$$

Posto isto, a tensão tangencial provocada por cada veículo tipo é calculada de acordo com o procedimento mencionado em 6.5.2.3, obtendo-se os resultados da Tabela 6.20,

Tabela 6.20 – Tensões tangenciais na ligação de alma da travessa superior ao caixão

Alma travessa – Alma caixão	
$\Delta\tau[\text{FLM4-a}]$	16,11 MPa
$\Delta\tau[\text{FLM4-b}]$	26,18 MPa
$\Delta\tau[\text{FLM4-c}]$	26,54 MPa
$\Delta\tau[\text{FLM4-d}]$	19,30 MPa
$\Delta\tau[\text{FLM4-e}]$	18,75 MPa

Como se pode verificar, todas as oscilações tensionais são inferiores ao limite de truncatura, $\Delta\tau_L$, pelo que o número de ciclos resistentes será infinito conduzindo a uma vida útil infinita independentemente do número de ciclos solicitantes.

Novamente, agilizando o cálculo através de uma folha de cálculo em Excel, desenvolvida com este propósito, procedeu-se de forma iterativa até se obter a categoria de pormenor que resultava num dano unitário.

Procedeu-se da mesma forma para os restantes pormenores, expandindo-se a análise para os restantes espaçamentos em planta (reações da Tabela 6.21), assim como as diferentes IMDs e configurações do veículo de fadiga FLM4.

Tabela 6.21 – Reação máxima numa travessa em função do espaçamento entre travessas consecutivas devido à passagem dos diferentes veículos pesados.

Veículo	Peso total (kN)	R_{max} (kN), espaçamento 4 m	R_{max} (kN), espaçamento 5 m	R_{max} (kN), espaçamento 6 m	R_{max} (kN), espaçamento 8 m
FLM4 (a)	200	130,0	135,3	146,7	160,5
FLM4 (b)	310	201,0	219,9	234,7	253,5
FLM4 (c)	490	210,9	222,9	231,4	278,3
FLM4 (d)	390	150,1	162,1	169,7	204,5
FLM4 (e)	450	138,3	157,5	173,9	219,9

A Tabela 6.22 apresenta as categorias mínimas dos pormenores do banzo superior e inferior, bem como da alma da travessa, assinalando-se a vermelho os casos em que as categorias de pormenores máximas são superadas.

Tabela 6.22 – Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado

Espaçamento (m)	IMD (·10 ⁶ vp/ano)	Banzo. sup. (1a, 1b)			Alma (4)			Banzo. Inf. (2a, 2b)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
4	2,000	56	74	78	56	74	78	122	162	171
	0,500	48	56	60	48	56	60	106	123	132
	0,125	<36	44	47	37	44	47	78	97	102
	0,050	<36	<36	37	<36	37	39	63	75	81
5	2,000	59	78	81	57	75	79	113	147	155
	0,500	50	59	63	48	57	61	94	113	119
	0,125	37	46	49	37	45	47	70	88	93
	0,050	<36	36	39	<36	37	39	56	68	73
6	2,000	60	77	80	58	75	78	112	144	150
	0,500	51	59	62	50	57	61	95	110	116
	0,125	38	46	48	38	45	47	70	86	90
	0,050	<36	36	38	<36	38	39	57	67	72
8	2,000	63	78	86	61	75	83	116	144	158
	0,500	50	62	66	48	60	64	91	115	122
	0,125	38	48	51	38	46	49	70	88	94
	0,050	<36	37	41	<36	39	41	55	69	75

Analisando os resultados presentes na Tabela 6.22, denota-se que o pormenor mais atingido é a ligação do banzo inferior à alma do caixão, apresentando em todos os casos de solicitação categorias superiores aos restantes pormenores sendo que, a categoria máxima de 80, é superada em todos os casos a partir de intensidades de tráfego de 125 mil veículos pesados por ano e tomando as configurações de longa e média distância do veículo FLM4.

Denota-se também a existência de um caso em que a categoria máxima para o pormenor de alma é superado na condição de afastamento de 8 m, e sob a intensidade de solicitação máxima, encontrando-se fora de perigo em todas as demais configurações de solicitação.

É também notável, o facto de as categorias mínimas obtidas para todos os pormenores variarem aproximadamente dentro do mesmo intervalo de valores para diferentes afastamentos em planta, pelo que esta variável não parece ter grande influência, tendo em conta o ajuste das secções em cada caso, no que toca à verificação de segurança destes pormenores à Fadiga.

Finalmente, por forma a garantir a segurança em todas as variantes de intensidades de tráfego no que toca ao pormenor do banzo superior, recomenda-se a execução de pormenores com transição circular entre chapas por forma a obter a categoria máxima de 90.

Por outro lado, a Tabela 6.23 apresenta os resultados em termos de dano para os pormenores 3a e 3b, cuja categoria corresponde a 80 e 90 respetivamente.

Tabela 6.23 – Dano na ligação do banzo superior e conetor de perno

Espaçamento (m)	IMD ($\cdot 10^6$ vp/ano)	Banzo. sup. (cat. 80, $\gamma_{Mf}=1,35$)			Pernos (cat. 90, $\gamma_{Mf,s}=1,00$)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
4	2,000	0,282	1,194	1,701	1,130	4,149	5,897
	0,500	0,070	0,299	0,425	0,283	1,037	1,474
	0,125	0,018	0,075	0,106	0,071	0,259	0,475
	0,050	0,007	0,030	0,043	0,028	0,104	0,147
5	2,000	0,350	1,422	1,976	1,369	4,837	6,651
	0,500	0,087	0,355	0,494	0,342	1,209	1,663
	0,125	0,022	0,089	0,123	0,086	0,302	0,416
	0,050	0,009	0,036	0,049	0,034	0,121	0,166
6	2,000	0,332	1,303	1,771	1,651	5,336	7,081
	0,500	0,083	0,326	0,443	0,413	1,334	1,770
	0,125	0,021	0,081	0,111	0,103	0,334	0,443
	0,050	0,008	0,033	0,044	0,041	0,133	0,177
8	2,000	0,340	1,516	2,221	2,343	9,159	13,620
	0,500	0,085	0,379	0,555	0,586	2,290	3,405
	0,125	0,021	0,095	0,139	0,146	0,572	0,851
	0,050	0,009	0,038	0,056	0,059	0,229	0,340

Neste caso, a presença do conetor de perno leva a que a categoria de pormenor no banzo superior seja de 80, e consequentemente a danos superiores à unidade resultado este que já se antevia pela análise da tabela anterior, uma vez que por forma a cobrir todas as condições de solicitação se necessitava de categoria 90.

Os resultados obtidos para o pormenor do conetor de perno revelam-se ainda mais críticos, pois o dano obtido para a intensidade de 2 e mesmo 0,5 milhões de veículos pesados por ano em todos os afastamentos, é superior à unidade, sendo muito superior nos casos de intensidade máxima de frequência e configuração de veículos pesados-tipo.

Perante os resultados obtidos, verifica-se que o dimensionamento das secções se vê condicionado pela fadiga, nos casos de intensidade de tráfego mais intensas. No caso dos pormenores sujeitos a tensões normais, aprecia-se que aumentando a quantidade de armadura passiva se obtém um incremento inercial significativo da secção, uma vez que esta se encontra fissurada. Esta alteração para além de ser a mais económica permite manter as secções obtidas pelo dimensionamento em Estado Limite Último e Serviço. No caso dos pernos conetores, verifica-se que um incremento de 50% da área destes elementos conduz a um dano 25 vezes inferior (relação de áreas elevado a 8) pelo que aumentando ligeiramente a quantidade destes elementos ou reduzindo o afastamento entre eles se garante a segurança à Fadiga em todas as configurações de solicitação.

6.5.4. SECÇÃO EM CAIXÃO COM TRAVESSA SUPERIOR ESCORADA

No caso desta tipologia seccional, procedeu-se de forma análoga ao caso anterior, tanto no cálculo do dano nos diferentes pormenores como na apresentação dos resultados.

É no entanto importante referir, que neste caso, pelo facto de a secção ser hiperstática procedeu-se à simulação da passagem transversal dos diferentes veículos pesados-tipo do modelo FLM4, representados pelas reacções da Tabela 6.21, por forma a obter a envolvente de esforços nas diferentes secções de análise, tal como já se havia referenciado em 6.2.2.3. Assim, o valor da oscilação de momento fletor assim como dos demais esforços, corresponde em cada caso à envolvente dos mesmos.

Relembra-se novamente, que tal como referido em 6.5.3.2, tendo em vista a obtenção da máxima tensão normal, procedeu-se ao uso de duas combinações de esforços,

- Momento fletor máximo e esforço axial concomitante;
- Esforço axial máximo e momento fletor concomitante;

Frisa-se no entanto, que o efeito conjunto do esforço axial com momento fletor foi obtido mediante a soma do efeito provocado por cada esforço com o seu sinal correto, já que somar os dois efeitos em módulo conduziria a valores de tensões demasiado conservativos.

Assim, recuperando o procedimento de cálculo do caso anterior, apresentam-se na Tabela 6.24 os resultados compilados sob a forma de categoria mínima para os pormenores na zona de ligação da travessa ao caixão metálico.

Tabela 6.24 - Categoria mínima de acordo com o Método do Dano Acumulado

Afastamento (m)	IMD ($\cdot 10^6$ vp/ano)	Banzo. sup. (1a, 1b)			Alma (4)			Banzo. Inf. (2a, 2b)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
4	2,000	55	73	77	53	70	74	46	61	64
	0,500	47	55	59	45	53	57	40	46	50
	0,125	<36	43	46	<36	42	44	<36	36	39
	0,050	<36	<36	36	<36	<36	37	<36	<36	<36
5	2,000	39	51	54	41	54	56	<36	<36	<36
	0,500	<36	39	42	<36	41	43	<36	<36	<36
	0,125	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36
	0,050	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36
6	2,000	40	51	53	44	56	58	<36	<36	<36
	0,500	<36	39	41	37	43	45	<36	<36	<36
	0,125	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36
	0,050	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36
8	2,000	44	55	60	39	49	54	<36	<36	<36
	0,500	<36	44	47	<36	39	42	<36	<36	<36
	0,125	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36
	0,050	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36	<36

Analisando os resultados da tabela, denota-se que neste caso, não parecem existir problemas de fadiga nos pormenores da zona de ligação da travessa ao caixão, uma vez que em nenhuma configuração de solicitação se ultrapassa a categoria máxima exequível para cada pormenor.

Aprecia-se também que o pormenor menos sensível é o pormenor de ligação do banzo inferior à alma do caixão metálico, sendo que a categoria mínima se encontra na maioria dos casos abaixo de 36. Os pormenores de ligação entre almas e a ligação dos banzos superiores apresentam resultados muito similares em toda a gama de solicitação, encontrando-se também estes em segurança desde que se garanta a categoria máxima em cada um.

Finalmente, frisa-se o facto de existir uma diminuição da categoria necessária quando se altera o espaçamento em planta de 4m para 5m, pelo facto da secção resultante do dimensionamento em Estado Limite Último e Serviço ser mais robusta e portanto menos sensível à ação da carga de fadiga.

No que toca à dupla verificação do banzo superior e conetores de perno, os resultados apresentam-se à semelhança do caso anterior sob a forma de dano, uma vez que as categorias para estes pormenores estão claramente definidas. Assim, a Tabela 6.25 resume o dano obtido para as várias configurações de solicitação,

Tabela 6.25 - Dano na ligação do banzo superior e conetor de perno

Afastamento (m)	IMD ($\cdot 10^6$ vp/año)	Banzo. sup. (cat. 80, $\gamma_{MF}=1,35$)			Pernos (cat. 90, $\gamma_{MF,s}=1,00$)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
4	2,000	0.104	0.626	1.044	0.608	2.233	3.173
	0,500	0.026	0.157	0.261	0.152	0.558	0.793
	0,125	0.007	0.039	0.065	0.038	0.140	0.198
	0,050	0.003	0.016	0.026	0.015	0.056	0.079
5	2,000	0.000	0.000	0.000	0.149	0.526	0.723
	0,500	0.000	0.000	0.000	0.037	0.132	0.181
	0,125	0.000	0.000	0.000	0.009	0.033	0.045
	0,050	0.000	0.000	0.000	0.004	0.013	0.018
6	2,000	0.000	0.000	0.000	0.255	0.824	1.094
	0,500	0.000	0.000	0.000	0.064	0.206	0.273
	0,125	0.000	0.000	0.000	0.016	0.052	0.068
	0,050	0.000	0.000	0.000	0.006	0.021	0.027
8	2,000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.051	0.076
	0,500	0.000	0.000	0.000	0.003	0.013	0.019
	0,125	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.005
	0,050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002

No caso do banzo superior, verifica-se que a maioria dos casos não apresentam problemas, obtendo-se dano ligeiramente superior à unidade apenas no caso de afastamento em planta de 4m e condições de solicitação máxima.

Novamente os conetores de perno demonstram ser o pormenor crítico, ainda que menos crítico comparativamente com o caso da travessa superior não escorada, obtendo-se danos consideráveis apenas no caso de afastamento de 4m e IMD de 2 milhões de veículos pesados por ano.

Nos casos em que seja necessário proceder a alterações seccionais, aprecia-se que a variável que mais influi no caso das tensões normais é a armadura passiva, pelo que o aumento deste gera um considerável incremento inercial, reduzindo as tensões normais provocadas pelo veículo de fadiga. No caso dos conetores, e à semelhança do que fora referido no caso anterior, um pequeno incremento de área destes elementos leva a reduções drásticas no dano obtido garantindo assim a segurança.

Também no que toca à zona central da travessa superior se efetuou uma análise do ponto de vista do dano, uma vez que todos os pormenores apresentam uma categoria clara. Os resultados encontram-se na Tabela 6.26;

Tabela 6.26 - Dano na ligação do banzo superior, inferior e conetor de perno

Afastamento (m)	IMD ($\cdot 10^6$ vp/ano)	Banzo. Inf (cat. 80) (6)			Banzo. sup. (cat. 80, $\gamma_{Mf}=1,35$)			Pernos (cat. 90, $\gamma_{Mf,s}=1,00$)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
4	2,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,125	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,050	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	2,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,125	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,050	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,125	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,050	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	2,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,125	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,050	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Analisando os resultados da Tabela 6.26, percebe-se que esta zona se encontra fora de perigo. Não existe dano em nenhum dos pormenores abordados em qualquer uma das configurações de tráfego. Neste caso o pormenor mais suscetível de sofrer dano seria o pormenor 6, de ligação transversal entre chapas de fundo, uma vez que é aquele sujeito à maior tensão normal pelo facto do eixo neutro se encontrar muito próximo da laje de betão, uma vez que a secção se encontra não fissurada.

Analisando os elementos de suporte da travessa, as escoras metálicas, resumem-se na Tabela 6.27, os resultados em termos de categoria mínima. Note-se que neste tipo de elemento se utilizam usualmente perfis tubulares soldados a chapas de Gusset. Esta ligação termina normalmente com um determinado declive, sendo necessário efetuar uma furação por forma a impedir a formação de pontos de concentração de tensões nas soldaduras, tal como se pode ver na Figura 6.32. Assim, encontram-se resumidos na Tabela 6.27 as categorias mínimas em função do afastamento, assinalando-se a vermelho o casos que superam a categoria máxima deste pormenor (7).

Tabela 6.27 – Dano na ligação da escora à chapa de Gusset de acordo com o Método do Dano Acumulado

IMD ($\cdot 10^6$ vp/ano)	Afastamento 4 m			Afastamento 5 m			Afastamento 6 m			Afastamento 8 m		
	TL	MD	TL	MD	LD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
2,000	56	74	78	53	69	72	56	72	75	59	73	80
0,500	48	56	60	44	53	56	48	55	58	46	58	62
0,125	<36	44	47	<36	41	43	<36	43	45	<36	45	48
0,050	<36	<36	37	<36	<36	<36	<36	<36	36	<36	<36	38

Como se pode observar na Tabela 6.27, o pormenor máximo de 71 é superado nos casos de intensidade máxima de solicitação para todos os casos de afastamento, sendo o dimensionamento destes elementos condicionado pela Fadiga. Assim, por forma a reduzir o impacto do intervalo de tensão seria necessário obter secções de maiores dimensões para estes elementos face às secções resultantes do dimensionamento em ELU e ELS.

6.5.5. SECÇÃO EM CAIXÃO SEM TRAVESSA SUPERIOR

No caso desta tipologia seccional, procedeu-se à análise de dois casos concretos de treliças internas, treliça tipo W e tipo M, cujas dimensões se fixaram em 2,5m de altura, e 3,5m e 4,5m de largura inferior e superior do caixão respetivamente, separadas em planta de 5m e tendo em conta uma excentricidade média do tráfego de 4,25m.

A análise à fadiga desta tipologia centra-se no estudo do pormenor das diagonais e montante superior supondo o uso de perfis duplos empresilhados, constituindo uma categoria de pormenor de 45 (pormenor 8) constituindo assim o pormenor crítico da secção. Assim o propósito desta secção é, para além de avaliar a segurança numa treliça interna com estas características geométricas, proceder à comparação de resultados entre as duas tipologias, W e M. Nas Tabelas 6.28 e 6.29, apresentam-se os resultados em termos de esforços axiais para ambas as tipologias de treliça interna com base na legenda da Figura 6.37.

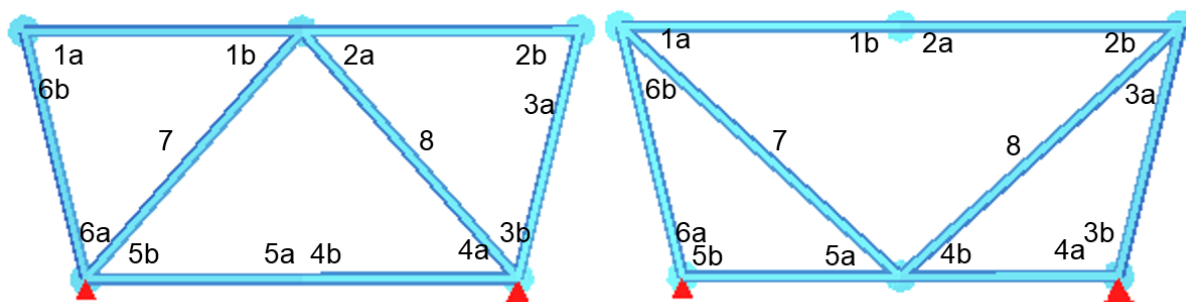


Figura 6.37 – Representação esquemática das tipologias de treliça interna

Tabela 6.28 – Esforços na treliça tipo W

Tipo W	H=2,5 m; B _{inf} =3,5 m; B _{sup} =4,5 m; E=4,25 m; Afastamento 5 m								
	1	2	3a	3b	4a,5b	4b,5a	6a	6b	7,8
FLM4a	-14,07	29,82	32,94	31,97	28,25	0,00	-31,97	-113,31	38,27
FLM4b	-20,26	42,87	47,54	45,98	40,63	0,00	-45,98	-162,82	55,05
FLM4c	-23,11	48,51	54,57	52,17	46,10	0,00	-52,17	-184,09	62,45
FLM4d	-18,21	38,22	43,01	41,10	36,32	0,00	-41,10	-145,02	49,20
FLM4e	-18,36	38,43	43,44	41,37	36,55	0,00	-41,37	-145,79	49,52

Tabela 6.29 – Esforços na treliça tipo M

Tipo M	H=2,5 m; B _{inf} =3,5 m; B _{sup} =4,5 m; E=4,25 m; Afastamento 5 m						
	1, 2	3a	3b,6a	4a,5b	4b,5a	6b	7,8
FLM4a	7,88	0,98	0,00	0,00	28,25	-81,34	42,22
FLM4b	11,30	1,56	0,00	0,00	40,63	-116,84	60,73
FLM4c	12,70	2,40	0,00	0,00	46,10	-131,92	68,90
FLM4d	10,00	1,91	0,00	0,00	36,32	-103,92	54,28
FLM4e	10,03	2,10	0,00	0,00	36,55	-104,43	54,63

Assim, recorrendo aos critérios de modelação de cargas explicitados em 6.2.2.3., às características seccionais mencionadas na Tabela 6.15, e ao procedimento de cálculo do dano, assumindo uma categoria de pormenor 45, apresentam-se nas Tabelas 6.30 e 6.31, os resultados obtidos para ambas as tipologias estudadas.

Tabela 6.30 – Dano nos pormenores de diagonal e montante superior de acordo com o MDA

Afastamento em planta (m)	IMD ($\cdot 10^6$ vp/año)	Treliza tipo W					
		Diagonais. (cat. 45, $\gamma_{MF}=1,15$)			Montante superior. (cat. 45, $\gamma_{MF}=1,15$)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
5	2,000	5,188	13,190	18,240	4,289	10,850	14,968
	0,500	1,297	3,298	4,559	1,072	2,712	3,742
	0,125	0,324	0,824	1,140	0,268	0,678	0,936
	0,050	0,130	0,330	0,456	0,107	0,271	0,374

Tabela 6.31 - Dano nos pormenores de diagonal e montante superior de acordo com o MDA

Afastamento em planta (m)	IMD ($\cdot 10^6$ vp/año)	Treliza tipo M					
		Diagonais. (cat. 45, $\gamma_{MF}=1,15$)			Montante superior. (cat. 45, $\gamma_{MF}=1,15$)		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD
5	2,000	8,31	20,54	28,110	0	0	0
	0,500	2,077	5,140	7,030	0	0	0
	0,125	0,519	1,280	1,757	0	0	0
	0,050	0,208	0,513	0,703	0	0	0

Analisando os resultados das Tabelas 6.30 e 6.31, aprecia-se que os elementos críticos são as diagonais frisando-se a influência da tipologia de treliça nos esforços do montante superior. Denota-se o facto de a partir de intensidades relativamente baixas, se obterem danos muito superiores à unidade, revelando a inadequabilidade da aplicação deste tipo de pormenores nestes elementos.

Denota-se também que os elementos diagonais da treliça tipo M sofrem mais, comparativamente com os elementos da tipologia W, verificando-se a ausência de dano no montante superior da primeira tipologia.

Assim, perante os resultados obtidos, denota-se que o uso de uniões empresilhadas neste tipo de elementos, condicionam fortemente o dimensionamento das secções por fadiga. Alternativamente a este tipo de pormenores sugere-se o uso de meios perfis laminados nos montantes superiores e no caso de uso de duplos perfis para as diagonais, proceder à sua união através de soldaduras contínuas ao longo de todo o elemento, aumentando consideravelmente a sua categoria (90, 112 ou 125 conforme o pormenor 10 da tabela 8.2).

6.6 CONCLUSÕES

Esta secção encerra o capítulo de análise local à fadiga de pontes mistas rodoviárias. Encontram-se aqui resumidas as principais conclusões retiradas da análise à fadiga levada a cabo para cada uma das tipologias seccionais estudadas.

-Tabuleiro de 3 vias de circulação – Secção em caixão com travessa superior não escorada

No que toca ao estudo da zona de ligação da travessa superior não escorada ao caixão metálico, conclui-se o seguinte:

- A união do banzo inferior da travessa à alma do caixão metálico (pormenor 2a,2b), assim como a banzo superior afetada pela presença do conetor de perno (pormenor 3a) e este último (pormenor 3b), constituem os pormenores críticos desta tipologia seccional.
- Pelo facto de se obterem danos superiores à unidade na banzo superior (3a) por efeito da presença do conetor de perno, seria necessário proceder a alterações seccionais vendo-se assim o dimensionamento obtido em Estado Limite Último, excluindo a fadiga, e Serviço condicionado por este fenómeno. Denota-se no entanto, que a variável mais eficaz e também mais económica, na alteração seccional é a armadura passiva, pois pelo facto de a secção se encontrar fissurada pequenos aumentos desta, conduzem a fortes incrementos inerciais reduzindo assim o impacto do intervalo de tensão.
- No que toca aos conectores de pernos e tal como já referido aquando da análise dos resultados obtidos, aprecia-se que apesar deste ser o pormenor que se apresenta mais crítico, poderá facilmente ser resolvido com pequenos incrementos de área deste elementos, já que um incremento de 50% de área conduzirá a uma redução drástica do dano obtido (cerca de 25 vezes menor).

-Tabuleiro de 4 vias de circulação – Secção em caixão com travessa superior escorada

Quanto à tipologia seccional em caixão com travessa superior escorada, aprecia-se uma notável redução da sensibilidade dos pormenores da zona de ligação da travessa ao caixão metálico pelo que,

- A união do banzo inferior da travessa à alma do caixão metálico (pormenor 2a,2b), a união entre alma da travessa e alma do caixão (pormenor 4) assim como a união do banzo superior com o banzo longitudinal (pormenor 1a, 1b), não constituem pormenores críticos, pois em nenhuma configuração de solicitação e geometria se verificou a necessidade de emprego de categorias superiores às máximas exequíveis para cada um destes pormenores.
- Verifica-se no entanto, ainda alguns casos em que o dano supera a unidade nos pormenores do banzo superior afetada da presença do conetor (3a) e este último (pormenor 3b), sendo que as alterações seccionais sugeridas no anterior caso se mantêm válidas pelas mesmas razões.

Relativamente à zona central da travessa superior, verifica-se que é uma zona que se apresenta insensível no que toca ao fenómeno da fadiga, pelo que todos os pormenores nesta zona parecem encontrar-se fora de perigo. Aprecia-se no entanto que apesar de não existir dano em nenhum dos pormenores desta zona (pormenor 3a, 3b, 6) o pormenor crítico seria a união transversal entre os banzos inferiores já que é aquele sujeito à maior variação de tensão.

Quanto às escoras metálicas, denota-se que, neste tipo de elementos, o mais usual é recorrer a elementos tubulares ocos, pelo que a sua união às chapas de Gusset constitui normalmente uma categoria de pormenor 71 facto este resultante da presença de uma furação que impede concentração de tensões nas soldaduras. Assim, a análise a fadiga levada a cabo para estes elementos conduziu às seguintes conclusões,

- A categoria de pormenor 71 é ultrapassada nas condições de tráfego mais exigente, em todos os casos de afastamento em planta entre travessas.
- É também importante referir que os esforços neste elemento, são fortemente condicionados pela altura da secção, já que o esforço axial existente corresponde ao binário de reação originado pela excentricidade das cargas. Assim no caso de secções muito baixas, questiona-se a adequabilidade do uso destes elementos já que o forte esforço axial conduziria a secções muito robustas e desproporcionadas comparativamente com a altura da secção.

-Tabuleiro de 1/2 vias de circulação – Secção em caixão sem travessa superior

Relativamente aos resultados obtidos para os dois casos de treliça interna estudados, denota-se que,

- O uso de presilhas como forma de união das diagonais e montantes superiores, condicionam fortemente a resistência à fadiga destes elementos tanto na tipologia em W como na tipologia M, por constituírem categorias de pormenor 45 (pormenor 5 da tabela 8.5 do EC3-1-9)
- Face à ordem de grandeza do dano obtido tanto no montante superior como nas diagonais, recomenda-se a substituição dos perfis empresilhados, por meios perfis laminados libertando assim a necessidade de monolitismo através de soldaduras.
- Alternativamente as diagonais poderiam ser unidas mediante soldaduras longitudinais ao longo dos elementos, constituindo assim categorias de pormenor superiores (90, 112 ou 125 conforme a tabela 8.2).

Posto isto, a grande conclusão nesta tipologia seccional, revela-se no facto da necessidade de aproximar cada vez mais a qualidade e execução dos pormenores destes elementos às pontes ferroviárias, por efeito do incremento, cada vez maior, do peso dos veículos pesados.

7.

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

O estudo realizado e detalhado ao longo dos 6 capítulos incluídos nesta dissertação, tinha como principal objetivo a análise à fadiga de pontes mistas rodoviárias, não só de uma perspetiva global mas também, segundo uma perspetiva local, de análise de elementos transversais críticos das tipologias seccionais mais usuais neste tipo de estruturas.

7.1.1. DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS REALIZADOS

A abordagem de análise à fadiga pode ser concretizada mediante a ótica da mecânica da fratura, que visa o estudo do comportamento de uma fissura de fadiga desde a sua nucleação até atingir uma dimensão crítica, ou mediante a ótica da resistência, através da análise do dano provocado pelas diversas solicitações ao longo da vida útil da estrutura através das curvas S-N. O estudo incorporado neste trabalho centra-se na segunda, recorrendo à aplicação do Método do dano acumulado e do Método simplificado presente no Eurocódigo 3 – parte 2, metodologia baseada no Método da tensão equivalente de dano.

O Método simplificado presente no Eurocódigo 3 – parte 2 constitui a metodologia mais prática e simples no que toca à verificação de segurança à fadiga de pontes metálicas/mistas rodoviárias. No entanto, a sua aplicação encontra-se sujeita a simplificações e conversões, que podem comprometer o carácter conservativo que se espera de uma metodologia deste tipo. Assim, por forma a comparar resultados, procedeu-se também à aplicação do Método do dano acumulado uma vez que este constitui um método mais rigoroso pelo facto de se encontrar isento de simplificações ou conversões.

A principal vantagem do Método do dano acumulado reside na sua precisão. O grau de precisão deste método depende diretamente da adequabilidade do espectro de solicitações esperado para a estrutura, que em conjunto com a aplicação de um método de contagem de ciclos, lhe conferem precisamente a sua maior vantagem. No âmbito deste estudo, assumiu-se não existirem quaisquer dados de tráfego, optando-se por aplicar as diferentes intensidades de tráfego de pesados, em função do número de vias lentas, prescritas na EN1992-1 (Tabela 4.1), assim como o modelo de carga de fadiga FLM4, cujas características dos veículos-tipo que o constituem advêm de dados estatísticos realizados nas principais estradas europeias. Desta forma, libertou-se o método da dependência dos espectros de cargas e metodologias de contagem, vaticinando desta forma que toda a análise efetuada jaz na norma Europeia, evitando-se suposições erróneas de tráfego e unificando-se os resultados de acordo com as recomendações normativas.

A análise global à fadiga centrou-se nas secções de centro de vão, uma vez que as secções de apoio dada a sua robustez se apresentam insensíveis às oscilações de tensão provocadas pela sobrecarga (Freitas, (2014)), mais concretamente no pormenor de ligação transversal de chapas de fundo, assumindo que esta ligação soldada ocorre precisamente na zona de flexão máxima positiva. Inicialmente, o grupo de análise era constituído por três pontes mistas rodoviárias, cujo dimensionamento havia sido efetuado com a norma Espanhola IAP98. Este conjunto era integrado por uma ponte em caixão isostática, uma ponte caixão contínua de três vãos e uma ponte bi-viga contínua de três vãos, cobrindo assim as tipologias mais comuns deste tipo de estruturas. Por forma a manter a coerência entre normas e assim obter resultados mais fiáveis, procedeu-se ao redimensionamento das secções de centro de vão destas estruturas de acordo com as ações presentes na EN1991-2. De seguida procedeu-se à análise à fadiga, não só do ponto de vista da verificação de segurança mas também da categoria mínima necessária para cumprir a mesma, das secções referidas recorrendo a ambas as metodologias de análise, tendo em conta as diferentes intensidades de tráfego, referidas na EN1991-2, e configurações do modelo de fadiga FLM4 e FLM3. Finalmente foi aplicada a abordagem referida acima para diferentes comprimentos de vão em cada tipologia de ponte mista, levando-se a cabo uma análise comparativa, por forma a avaliar a influência, não só da variação do comprimento do vão principal mas também a influência da variação do comprimento do vão lateral, comparativamente ao vão central, nos resultados obtidos através de ambas as metodologias. O conjunto de estruturas abrangido no âmbito desta análise global é constituído por,

- Pontes caixão isostáticas, com comprimentos de vão de 20, 30, 45,5 e 60 m.
- Pontes caixão contínuas de três vãos, com comprimentos de vão principal de 30, 45, 60 e 75 m, variando quatro vezes o comprimento do vão lateral, dentro de proporções da ordem dos 60% a 100% do comprimento do vão principal, em cada cenário de vão principal admitido.
- Pontes bi-viga contínuas de três vãos, com comprimentos de vão principal de 30, 45, 60 e 75 m, variando quatro vezes o comprimento do vão lateral, dentro de proporções da ordem dos 60% a 100% do comprimento do vão principal, em cada cenário de vão principal admitido.

A análise local à fadiga centrou-se no estudo de três tipologias de secção transversal usuais de acordo com o número de vias de circulação existentes. Neste caso, recorreu-se apenas à aplicação do Método do dano acumulado em conjunto com o modelo de carga FLM4, uma vez que não existem regras de aplicação do método simplificado para elementos de secções transversais. Assim, foram analisadas tipologias seccionais de 2, 3 e 4 vias de circulação sendo materializadas pelas seguintes secções transversais:

- Secção em caixão sem travessa superior;
- Secção em caixão com travessa superior não escorada;
- Secção em caixão com travessa superior escorada;

O funcionamento transversal de cada uma das tipologias referidas depende dos elementos que a constituem, e também da sua conexão à laje de betão, resultando em cada uma delas elementos críticos distintos. Assim a análise à fadiga centrou-se no primeiro caso, na treliça interna do caixão metálico, mais concretamente na ligação entre os elementos que materializam as diagonais e o montante superior, no segundo caso, na ligação da travessa superior ao caixão metálico, e no último caso, na ligação da travessa superior ao caixão, na zona central desta e na zona de ligação da escora ao caixão. À semelhança do que foi efetuado na análise global, também no âmbito desta análise se procedeu ao dimensionamento, em função do afastamento em planta entre travessas consecutivas, das secções

críticas de acordo com as ações prescritas na EN1991-2. No entanto, este dimensionamento apenas foi aplicado às duas últimas tipologias, uma vez que no caso da primeira, as soluções de treliça interna são muito variadas e dependentes dos critérios pessoais do projetista, optando-se por estudar dois casos concretos de treliças internas. Os pormenores alvo de estudo à fadiga, englobados nesta análise local, foram:

- Ligação do banzo superior da travessa transversal ao banzo longitudinal.
- Ligação do banzo superior com a alma da travessa transversal.
- Ligação do banzo inferior da travessa superior à alma do caixão.
- Ligação da alma da travessa superior ao banzo inferior.
- Ligação do conector de perno com ao banzo superior da travessa transversal.
- Ligação da alma da travessa à alma do caixão metálico.
- Ligação transversal de banzos inferiores da travessa.
- Ligação das escoras ao Gusset de ligação à alma do caixão.
- Ligação entre os duplos perfis do montante superior/diagonal.
- Ligação das diagonais à chapa de Gusset.

7.1.2. CONCLUSÕES GERAIS

Da análise do conjunto de estruturas referido no âmbito da análise global, resultaram as seguintes conclusões gerais, no que toca à aplicação do Método do dano acumulado:

- Em todos os casos estudados, o veículo FLM3 parece encontrar-se calibrado para reproduzir os resultados do veículo FLM4 na sua configuração mais exigente (Tráfego de longa distância), quando assumida a intensidade máxima de tráfego de 2 milhões de veículos pesados por ano.
- No caso das pontes isostáticas constatou-se que a categoria mínima diminui à medida que o comprimento do vão aumenta, referindo-se que o dimensionamento em ELU não é condicionado pela fadiga, uma vez que as categorias ótimas obtidas são inferiores à categoria máxima exequível para o pormenor de ligação transversal da chapa de fundo.
- No caso das tipologias de pontes contínuas verificou-se globalmente que para proporções menores entre o vão lateral e o vão principal, o primeiro é mais afetado exigindo categorias de pormenor superiores, invertendo-se esta conclusão à medida que o comprimento do vão lateral se aproxima do comprimento do vão central.
- Em ambas as tipologias de pontes contínuas se verificou que o dimensionamento à fadiga se revela condicionante para intensidades de tráfego superiores a 0,5 milhões de veículos pesados por ano, denotando-se a maior suscetibilidade da tipologia bi-viga ao exigir categorias de pormenor muito superiores à categoria máxima exequível para o pormenor de ligação transversal (112).

As conclusões resultantes da aplicação do método simplificado do Eurocódigo 3 – parte 2 às estruturas mencionadas, podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- O Método simplificado apresenta categorias mínimas inferiores às categorias obtidas através do Método do dano acumulado, sempre que a intensidade de tráfego supera os 0,5 milhões de veículos pesados por ano, tanto para o modelo FLM3 como para o modelo FLM4.
- O método apresenta resultados conservativos removendo o coeficiente limitativo, λ_{MAX} , até comprimentos de vão de 45 m, sendo que o mesmo não se verifica para comprimentos superiores, pelo facto do coeficiente λ_1 diminuir com o comprimento do vão. A adoção de

um valor fixo de 2,2, tal como sugerem os estudos de Freitas (2014), conduziria a resultados sempre do lado da segurança.

- Os resultados obtidos através do Método do dano acumulado seriam perfeitamente reproduzidos calibrando o coeficiente, λ_{MAX} , em função da intensidade de tráfego, sempre e quando o valor inicial deste coeficiente é próximo de 2,2.
- O método simplificado seria conservador em todos os casos de comprimento de vão, intensidades de tráfego, e veículos de fadiga, substituindo o coeficiente referido por um coeficiente λ_{MIN} , e fixando o valor de λ_1 em 2,2 (Freitas, 2014). Assim, os valores dos coeficientes λ_{MIN} e λ seriam dados por,

$$\lambda_{MIN} = 2,2 \times \left(\frac{N_{OBS}}{N_0} \right)^{1/5}$$

e

$$\lambda = \max(\lambda_{MIN}; 2,2 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4)$$

No âmbito da análise local, as conclusões gerais obtidas do estudo das ligações referidas, encontram-se resumidas nos seguintes parágrafos,

- No caso da secção em caixão com travessa superior não escorada, as ligações críticas são a ligação do banzo inferior da travessa à alma do caixão, a banzo superior pela presença do conector de perno e o próprio conector, obtendo-se danos superiores às unidades nos dois últimos pormenores e categorias superiores às máximas exequíveis para o pormenor do primeiro caso.
- No caso da secção em caixão com travessa superior escorada, denota-se que são críticas as ligações do banzo superior afetada da presença do conector de perno e o próprio conector, e a ligação das escoras transversais ao caixão metálico, verificando-se no entanto que a zona central da travessa superior não apresenta qualquer problema.
- No caso da secção em caixão sem travessa superior, verificou-se que, para ambos os casos de treliça interna estudados, o uso de presilhas, para garantir o funcionamento conjunto dos elementos constituintes das diagonais e montante superior, é altamente condicionante, conduzindo a danos muito superiores à unidade nos casos de intensidades de tráfego mais exigentes.
- O aumento da quantidade de armadura passiva, no que toca às zonas de ligação das travessas ao caixão metálico, influi profundamente nas categorias obtidas para estas ligações. Esta influência deve-se ao facto de o incremento de armadura passiva conduzir a consideráveis aumentos de inércia uma vez que a secção se encontra fissurada, levando consequentemente a uma redução das tensões verificadas. No caso dos conectores de perno, verifica-se facilmente que um pequeno incremento de área destes elementos conduz a reduções dramáticas em termos de dano (relação de áreas elevada ao expoente da curva de fadiga).
- No caso de elementos permanentemente comprimidos, como é o caso das escoras metálicas, assim como a ligação entre o banzo da travessa superior e o caixão metálico, questiona-se a necessidade de verificações à fadiga uma vez que a compressão permanente destes pormenores dificulta a formação de fissuras por fadiga.
- Por fim, no caso das treliças internas, verificou-se a necessidade de alteração no processo de união, tanto das diagonais como do montante superior. Assim tanto no caso do montante superior como das diagonais, a ligação empresilhada poderia ser substituída por

meios perfis laminados ou por duplos perfis unidos mediante um cordão de soldadura ao longo de todo o elemento conduzindo a categorias de pormenor superiores.

Finalmente refere-se que todos os cálculos à fadiga foram efetuados através de folhas cálculo em Excel, desenvolvidas propositadamente para a realização desta dissertação, proporcionando à empresa não só uma maior facilidade de análise à fadiga, quer através do Método do dano acumulado, quer através do Método simplificado do Eurocódigo 3 – parte 2, de estruturas com configurações similares às estudadas, mas também análises expeditas através da consulta dos resultados obtidos, uma vez que a gama de vãos e tipologias seccionais estudadas englobam uma grande percentagem das soluções típicas de pontes mistas rodoviárias.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O estudo levado a cabo no presente trabalho englobou um grande número de estruturas e cobriu uma grande percentagem das tipologias comuns de pontes mistas rodoviárias. No entanto, existem alguns aspetos que se consideram interessantes explorar em futuros trabalhos, nomeadamente,

- No âmbito da análise longitudinal, a análise à fadiga da armadura passiva sobre os apoios poderia constituir uma expansão interessante.
- Alargar o conjunto de estruturas analisadas, avaliando o impacto das correções sugeridas neste trabalho em comprimentos de vão superiores aos limites impostos na metodologia simplificada da EN1993-2.
- A clarificação da origem do coeficiente limitativo de dano, λ_{\max}
- A expansão do estudo efetuado para outras normas, poderia constituir uma ferramenta interessante de comparação entre normas de dimensionamento.
- No âmbito da análise local, o estudo de diferentes tipologias seccionais, complementando o conjunto de elementos analisados no presente trabalho, por forma a sistematizar o processo de verificação à fadiga em ligações críticas.

8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bathias, C., Pineau, A. (2010). *Fatigue of Materials and Structures – Fundamentals*. ISTE Ltd, John Wiley & Sons.
- Brozzetti, J. Bui, V., Calgaro J-A., Chabrolin, B., Kretz, T., Nussbaumer, A., Plu, B., Ramondenc, Raoul, J., Roche, J. (1996). *Ponts Metalliques et Mixtes – Resistance à la fatigue. Service d'études techniques des routes et autoroutes*. França.
- Branco, C. Fernandes, A., Castro, P., (1999). *Fadiga de Estruturas Soldadas*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Croce, P. (2001). *Background to Fatigue Load Models for Eurocode 1: Part 2 Traffic Loads*. Progress in Structural Engineering and Materials, Volume 3 – Número 4, Outubro-Novembro, 2001, Páginas 335-345, John Wiley & Sons.
- European Committee for Standardization (CEN) (2009) *EN1990 – Eurocode: Basis of Structural Design*.
- European Committee for Standardization (CEN) (2003). *EN1991-2 – Eurocode 1: Actions on Structures – Part 2: Traffic Loads on Bridges*.
- European Committee for Standardization (CEN) (2010) *EN1992-1-1 – Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*.
- European Committee for Standardization (CEN) (2002) *EN1993-1-9 – Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-9: Fatigue Strength of Steel Structures*.
- European Committee for Standardization (CEN) (2006). *EN1993-2 – Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 2: Steel Bridges*.
- European Committee for Standardization (CEN) (2005) *EN1994-2 – Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 2: General Rules and Rules for Bridges*.
- Freitas, M. (2014). *Verificação de Segurança à Fadiga de Pontes Metálicas*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fryba, L., (1996). *Dynamic of Railway Bridges*. Thomas Telford, Praga.
- Marques, F. (2006). *Avaliação do Comportamento Estrutural e Análise de Fadiga em Pontes Metálicas Ferroviárias*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ministerio de Fomento – Gobierno de España (1998). *Instrucción sobre las Acciones a considerar en el Proyecto de Puentes de Carretera (IAP98)*.
- Pook, L. (2007). *Metal Fatigue*. Springer, University College London, UK.
- Pravia, Z. (2003). *Estabilidade de Estruturas de Pontes Metálicas com Fraturas*. Tese submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Ribeiro, D. (2004). *Comportamento Dinâmico de Pontes sob Acção de Tráfego Ferroviário a Alta Velocidade*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Smith, R. (1990). *The Versailles railway accident of 1842 and the first research into metal fatigue*. EMAS, Birmingham, p. 2033-2041.

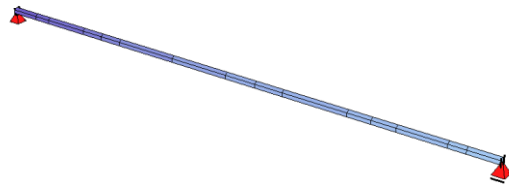
Stephens, R., Fatemi, A., Stephens, R., Fuchs, H. (2001). *Metal Fatigue In Engineering*. John Wiley & Sons Inc.

Suresh, S. (1998). *Fatigue of Materials*. Cambridge University press.

Tembe, A. (2001). *Fadiga em Pontes Mistas Aço-betão*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

ANEXO A – RESULTADOS GERAIS DO CAPÍTULO 5

Quadro A.1.1 - Resumo de esforços ELU, sobrecarga e oscilação de momentos flectores

Resumo de Esforços - ΔM -kN.m					Modelo Numérico	
Caso	Comprimento do vão					
	18 m	20 m	22,5 m	30 m		
M _d (ELU)	18020	36243	76436	127800		
M _{max} LM1	6676	11637	21272	32428		
ΔM (FLM3)	1572	2736	4596	6336		
ΔM (FLM4a)	957	1436	2170	2857		Localização das secções analisadas
ΔM (FLM4b)	1305	2056	3292	4415		
ΔM (FLM4c)	1588	2794	4679	6465		
ΔM (FLM4d)	1189	2168	3686	5105		
ΔM (FLM4e)	1307	2438	4173	5779		

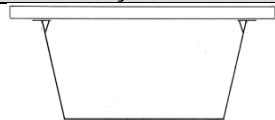

Quadro A.1.3 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método Dano Acumulado													
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Secção S1											
		20 m			30 m			45,5 m			60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	77			75			65			53		
FLM4		56	70	78	56	70	76	48	60	66	39	49	54
FLM3	0,5	67			66			57			46		
FLM4		47	56	60	42	56	60	37	48	52	30	39	42
FLM3	0,125	51			50			43			35		
FLM4		35	43	46	32	42	40	27	37	40	22	29	32
FLM3	0,05	42			42			36			29		
FLM4		28	34	37	25	33	37	21	28	32	17	23	26

Quadro A.1.4 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão

Método Simplificado do EC3-2 – Aplicação estricta													
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Secção S1											
		20 m			30 m			45,5 m			60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	67			61			53			42		
FLM4		66	67	67	61	61	61	50	53	53	38	42	42
FLM3	0,5	67			61			53			42		
FLM4		50	64	67	47	60	61	38	49	53	29	37	40
FLM3	0,125	57			54			44			33		
FLM4		38	49	53	36	46	50	29	37	41	22	28	30
FLM3	0,05	48			45			36			27		
FLM4		32	41	44	30	38	42	24	31	34	18	23	25

Quadro A.1.2 - Resumo das características seccionais da secção.

Vão Central 30 m								
Secção Real				Secção Estrutural Equivalente				
								
Características Seccionais	Vão Lateral – S1							
	20 m		30 m		45,5 m		60 m	
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]
H _{Total} [cm]	100		120		190		250	
H _{Metal} [cm]	75		95		165		225	
Laje [cm]	1060	25	1060	25	1060	25	1060	25
² xPlat. Sup.	80	1,5	80	1,5	80	1,5	80	1,5
² xAlma [cm]	2	71,5	2	90,5	2	160	2	219
Plat. Inf.[cm]	350	2	350	3	350	3,5	350	4,5
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	4888263		9857855		30539629		65495580	
Y _G [cm]	26,82		36,21		57,24		83,72	

Quadro A.1.5 - Comparação entre resultados obtidos através do MDA e Método Simplificado.

Método Simplificado do EC3-2 – com λ _{MAX} CORRIGIDO									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Secção S1							
		20 m		30 m		45,5 m		60 m	
		MDA	M.S	MDA	M.S	MDA	M.S.	MDA	M.S.
FLM3	2	77	88	75	80	65	69	53	56
FLM3	0,5	67	67	66	60	65	52	46	42
FLM3	0,125	51	51	50	46	43	40	35	32
FLM3	0,05	42	43	42	39	36	33	29	27

Quadro A.1.6 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão livre da influência do coeficiente limitativo de dano λ_{MAX}.

Método Simplificado do EC3-2 – sem λ _{MAX}													
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Secção S1											
		20 m			30 m			45,5 m			60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	100			94			77			58		
FLM4		67	85	93	62	80	88	51	65	71	38	49	54
FLM3	0,5	76			72			58			44		
FLM4		50	65	71	47	60	66	38	49	55	29	37	41
FLM3	0,125	57			54			44			35		
FLM4		38	49	54	36	46	50	29	37	41	22	28	30
FLM3	0,05	48			45			36			29		
FLM4		32	41	44	30	38	42	24	31	34	18	24	26

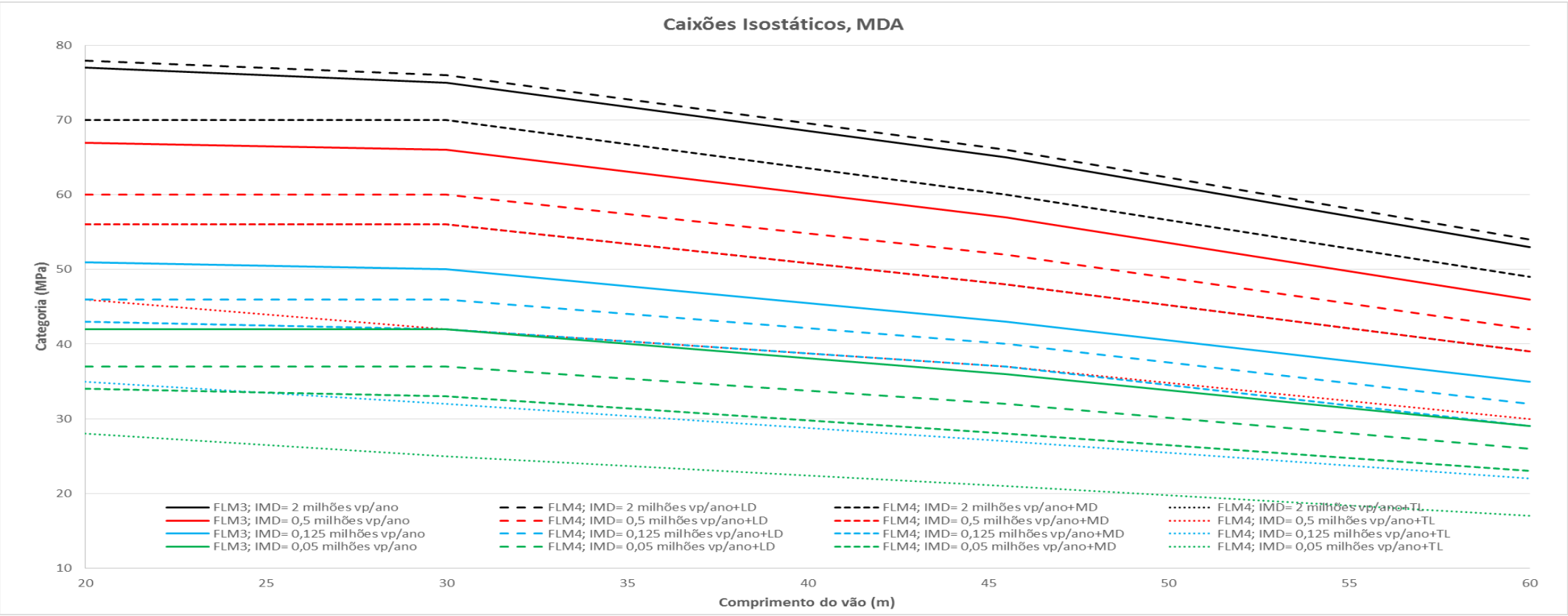


Figura A.1.1 - Evolução da categoria óptima em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA.

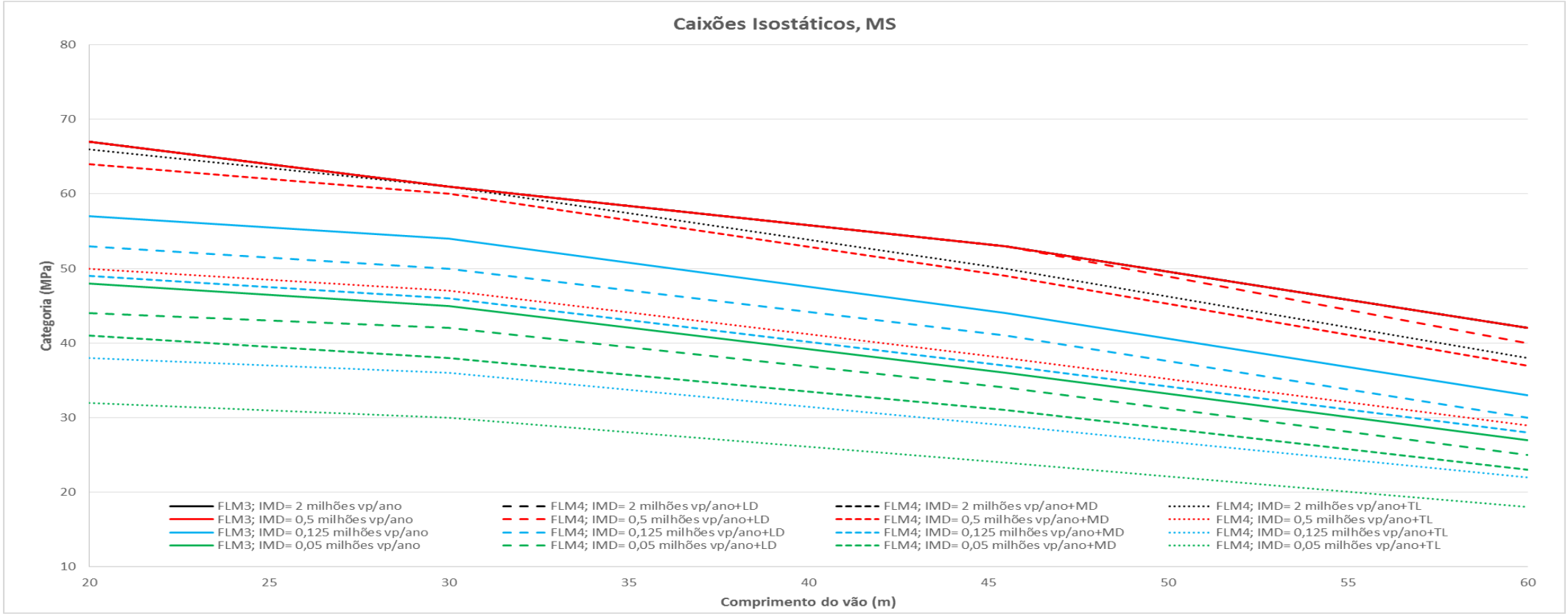
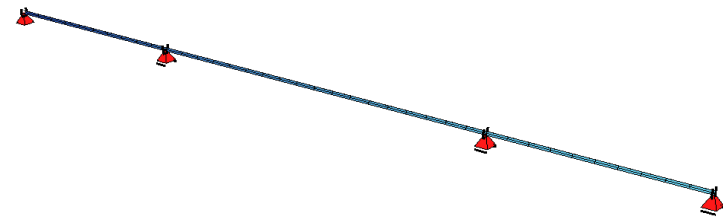
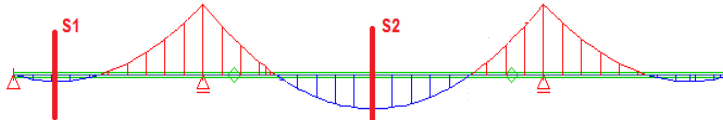


Figura A.1.2 - Evolução da categoria óptima em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

Quadro A.1.7 - Resumo de esforços ELU, sobrecarga e oscilação de momentos flectores

Resumo de Esforços - ΔM -kN.m									Modelo Numérico	
VÃO PRINCIPAL 30 m										
Caso	Vão Lateral				Vão Principal					
	18 m	20 m	22,5 m	30 m	18 m	20 m	22,5 m	30 m		
M _d (ELU)	10582	12040	15087	16065	19726	16541	16291	7164		
M _{max} LM1	5931	6767	7821	11364	7615	7754	7917	8336		
ΔM (FLM3)	1681	1846	2056	2680	1619	1697	1794	2095		
ΔM (FLM4a)	983	1042	1115	1411	951	979	1014	1123		Localização das secções analisadas
ΔM (FLM4b)	1371	1484	1618	2014	1316	1362	1420	1597		
ΔM (FLM4c)	1729	1901	2117	2760	1654	1734	1836	2135		
ΔM (FLM4d)	1261	1399	1571	2084	1283	1331	1391	1628		
ΔM (FLM4e)	1360	1519	1718	2315	1391	1462	1550	1821		

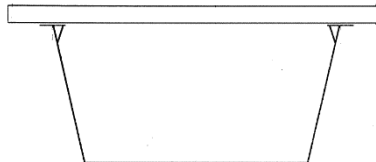
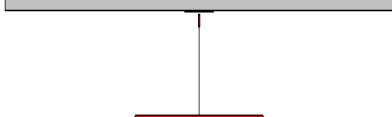
Quadro A.1.9 - Categoria ótima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																																	
VÃO PRINCIPAL 30 m																																	
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal																			
	(·10 ⁶ vp/año)	18 m				20 m				22,5 m				30 m				18 m				20 m				22,5 m				30 m			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD					
FLM3	2		86				94				105				137				83				87				92				107		
FLM4		63	80	88	69	88	97	77	98	108	101	127	141	62	76	85	64	80	89	68	85	94	79	99	109								
FLM3	0,5		75				82				91				119				72				76				80				93		
FLM4		50	63	68	54	70	75	58	78	83	76	101	109	49	61	66	50	64	69	52	68	73	60	79	84								
FLM3	0,125		57				62				69				90				55				57				61				71		
FLM4		38	49	52	41	53	58	45	59	64	58	76	84	37	47	51	39	49	53	41	52	56	46	59	65								
FLM3	0,05		47				52				58				75				46				48				51				59		
FLM4		31	38	42	33	41	46	36	46	51	46	50	67	30	37	41	31	38	42	32	40	45	36	47	52								

Quadro A.1.10 - Categoria mínima segundo o Método Simolificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfeco e distribuição dos comorimentos de vão.

Método Simplificado do EC3-2 – Aplicação estricta																											
VÃO PRINCIPAL 30 m																											
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão Lateral												Vão Principal													
		18 m			20 m			22,5 m			30 m			18 m			20 m			22,5 m			30 m				
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD		
FLM3	2	77			82			88			110			67			70			74			86				
FLM4		74	77	77	81	82	82	88	88	88	110	110	110	67	67	67	70	70	70	74	74	74	86	86	86		
FLM3	0,5	77			82			88			110			67			70			74			86				
FLM4		56	72	77	61	79	82	68	87	88	86	110	110	52	66	67	54	70	70	57	74	74	67	86	86		
FLM3	0,125	65			71			78			98			59			62			66			77				
FLM4		43	55	60	47	60	65	51	66	72	65	83	91	39	50	55	41	53	58	43	56	61	51	65	71		
FLM3	0,05	54			59			65			82			49			52			55			64				
FLM4		36	46	50	39	50	54	43	55	60	54	69	76	33	42	46	34	44	48	36	46	51	42	54	59		

Quadro A.1.8 - Resumo das características seccionais da secção de vão lateral e central.

Vão Central 30 m									
Secção Real					Secção Estrutural Equivalente				
									
Características Seccionais	Vão Lateral – S1								
	18 m		20 m		22,5 m		30 m		
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	
H _{Total} [cm]	120		120		120		120		
H _{Metal} [cm]	92		92		92		92		
Laje [cm]	1235	28	1235	28	1235	28	1235	28	
² xPlat. Superior [cm]	80	1,5	80	1,5	80	1,5	80	1,5	
² xCélula Sup [cm]	2,11	25	2,11	25	2,11	25	2,11	25	
² xAlma [cm]	2,2	89,5	2,2	89,5	2,2	89,5	2,2	89,5	
Plat. Inf.[cm]	500	1	500	1	500	1	500	1	
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	6239161		6239161		6239161		6239161		
Y _G [cm]	23,88		23,88		23,88		23,88		
Características Seccionais	Vão Central – S2								
	18 m		20 m		22,5 m		30 m		
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	
H _{Total} [cm]	120		120		120		120		
H _{Metal} [cm]	92		92		92		92		
Laje [cm]	1235	28	1235	28	1235	28	1235	28	
² xPlat. Superior [cm]	80	1,5	80	1,5	80	1,5	80	1,5	
² xCélula Sup [cm]	2,11	25	2,11	25	2,11	25	2,11	25	
² xAlma [cm]	2,2	89,5	2,2	89,5	2,2	89,5	2,2	89,5	
Plat. Inf.[cm]	500	1	500	1	500	1	500	1	
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	6239161		6239161		6239161		6239161		
Y _G [cm]	23,88		23,88		23,88		23,88		

Quadro A.1.11 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																											
VÃO PRINCIPAL 30 m																											
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal													
	(·10 ⁶ vp/año)	18 m			20 m			22,5 m			30 m			18 m			20 m			22,5 m			30 m				
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD		
FLM3	2		86				94				105				137			83			87			92			107
FLM4		63	80	88	69	88	97	77	98	108	101	127	141	62	76	85	64	80	89	68	85	94	79	99	109		
FLM3	0,5		75				82				91				119			72			76			80			93
FLM4		50	63	68	54	70	75	58	78	83	76	101	109	49	61	66	50	64	69	52	68	73	60	79	84		
FLM3	0,125		57				62				69				90			55			57			61			71
FLM4		38	49	52	41	53	58	45	59	64	58	76	84	37	47	51	39	49	53	41	52	56	46	59	65		
FLM3	0,05		47				52				58				75			46			48			51			59
FLM4		31	38	42	33	41	46	36	46	51	46	50	67	30	37	41	31	38	42	32	40	45	36	47	52		

Quadro A.1.12 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão livre da influência do coeficiente limitativo de dano λ_{MAX}.

Método Simplificado do EC3-2 – Sem λ_{MAX}																									
VÃO PRINCIPAL 30 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral												Vão Principal											
		18 m			20 m			22,5 m			30 m			18 m			20 m			22,5 m			30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	113			123			134			171			104			109			116			134		
FLM4		75	96	105	81	104	114	90	115	126	113	145	159	69	88	96	71	92	101	76	97	106	88	114	124
FLM3	0,5	86			93			103			130			79			82			87			102		
FLM4		57	73	79	62	79	87	68	87	95	86	110	120	52	67	73	54	70	76	58	74	81	67	86	34
FLM3	0,125	65			71			78			98			60			63			66			77		
FLM4		43	55	60	47	60	66	44	66	72	65	84	92	40	51	55	41	53	58	51	56	61	51	65	72
FLM3	0,05	54			59			65			82			50			52			55			64		
FLM4		36	46	50	39	50	55	43	55	60	54	70	76	33	42	46	35	44	48	36	47	51	43	55	60

Quadro A.1.13 - Comparação entre resultados obtidos através do MDA e Método Simplificado recalibrando o coeficiente λ_{MAX} em função da intensidade de tráfego.

Método Simplificado do EC3-2 – com λ _{MAX} EXPERIMENTAL																			
VÃO PRINCIPAL 30 m																			
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral										Vão Principal							
		18 m		20 m		22,5 m		30 m		18 m		20 m		22,5 m		30 m			
		MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.
FLM3	2	86	102	94	109	105	116	137	146	83	88	87	92	92	98	107	114		
FLM3	0,5	75	78	82	83	91	88	119	110	72	67	76	70	80	74	93	86		
FLM3	0,125	57	59	62	63	69	67	90	84	55	51	57	53	61	56	71	66		
FLM3	0,05	47	49	52	52	58	57	75	70	46	42	48	44	51	47	59	55		

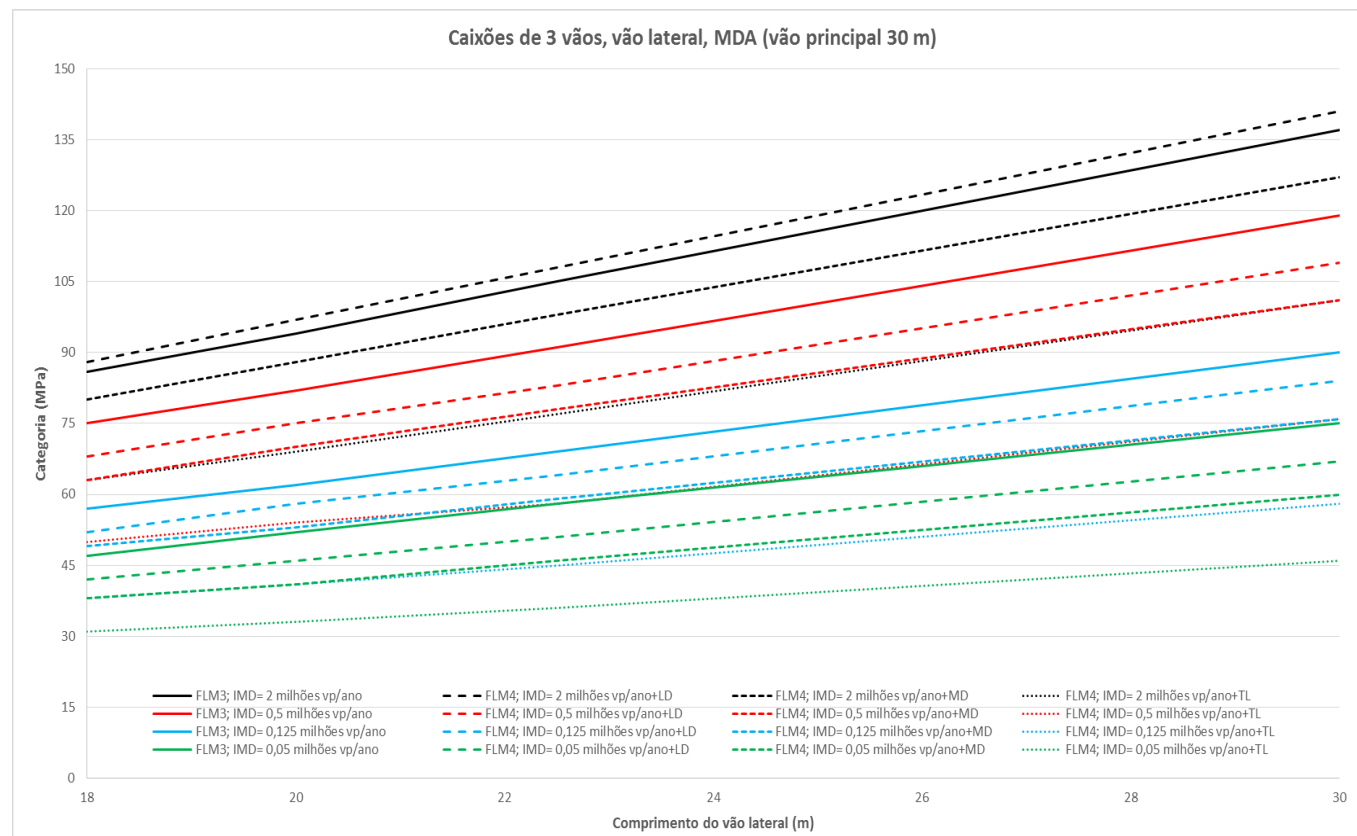


Figura A.1.5 - Evolução da categoria ótima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA.

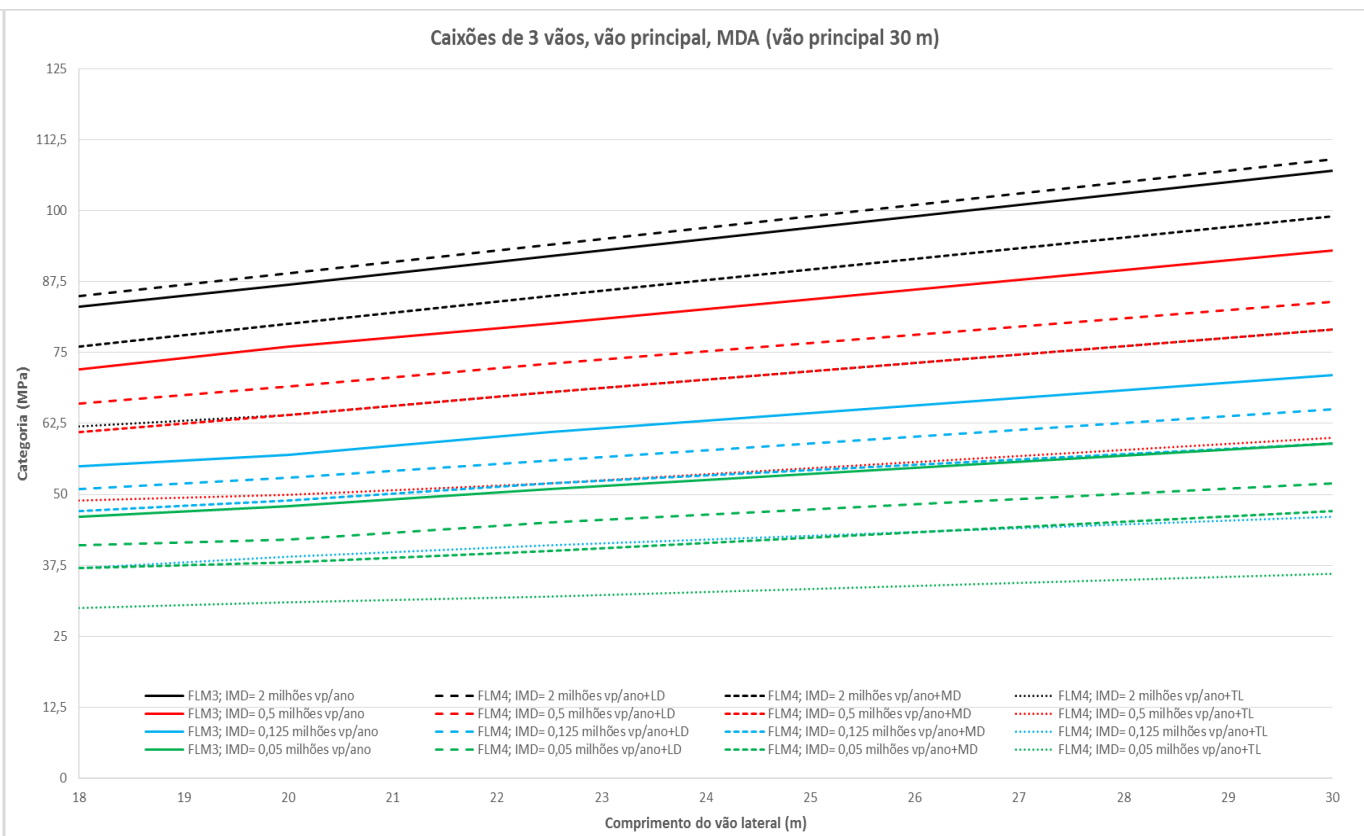


Figura A.1.6- Evolução da categoria ótima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA.

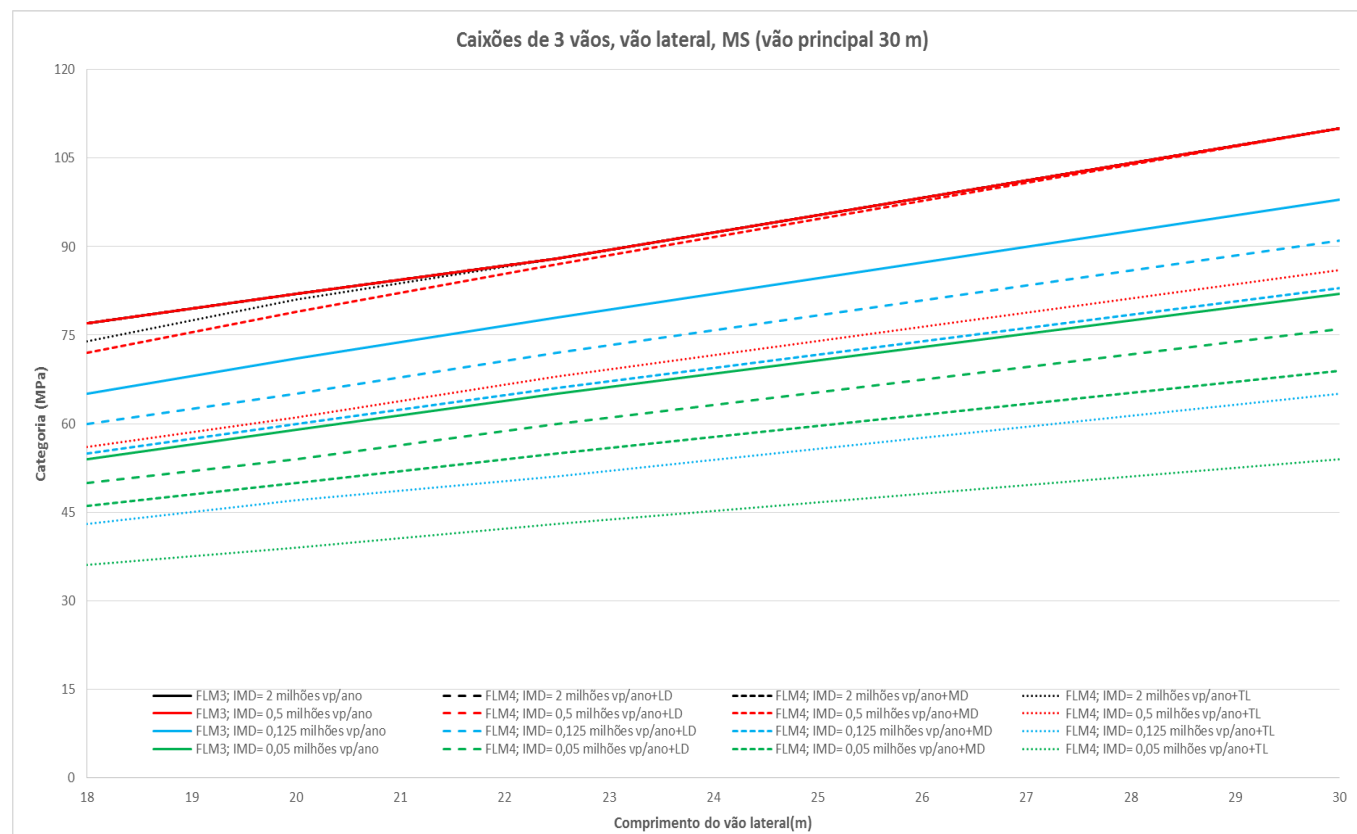


Figura A.1.7- Evolução da categoria ótima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

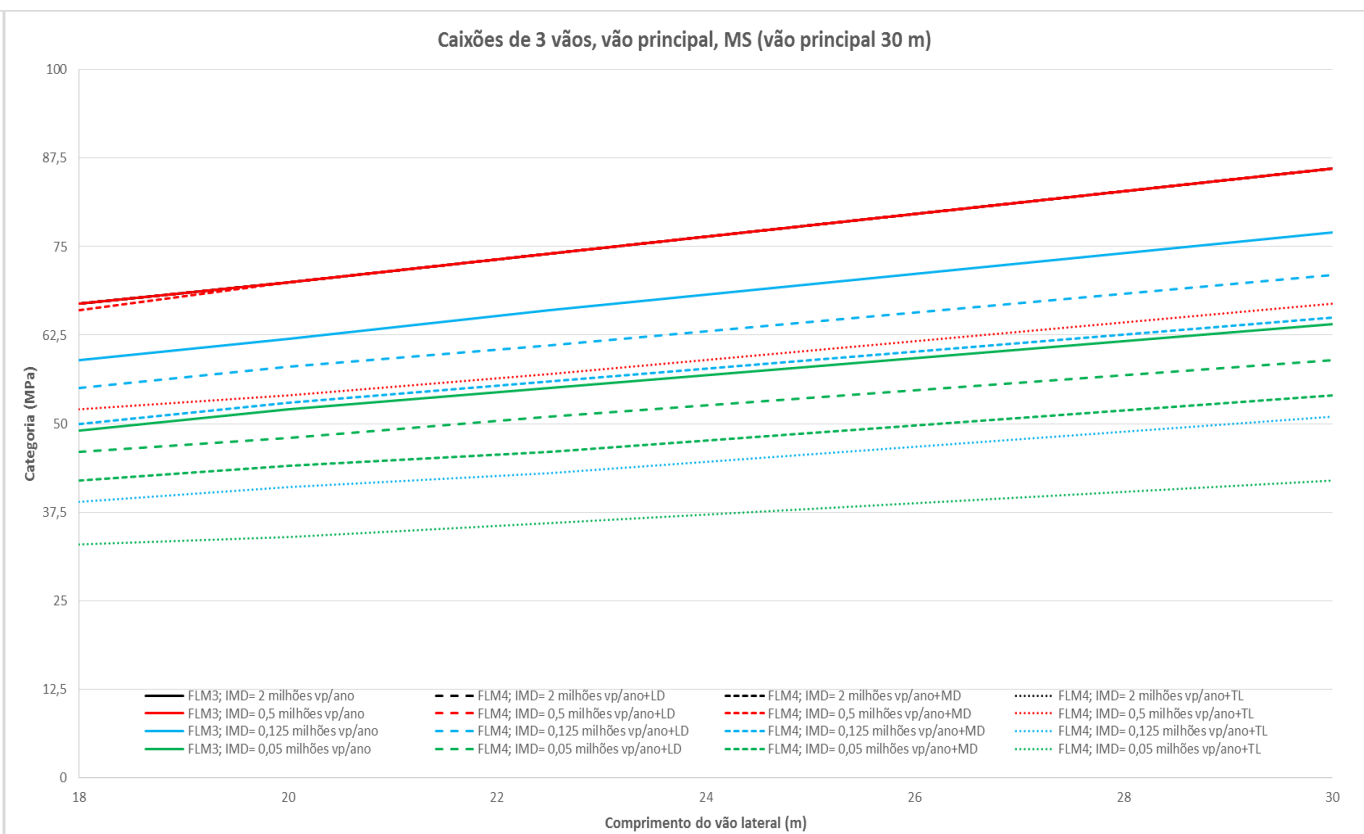
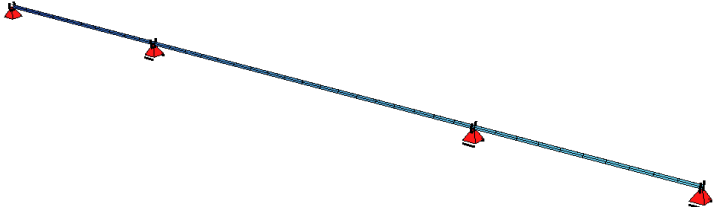
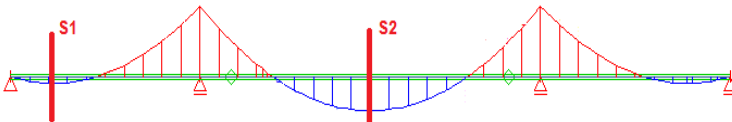
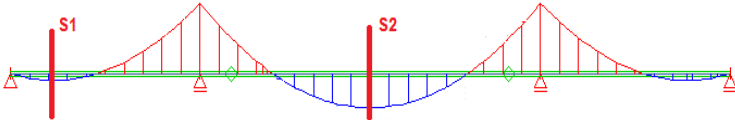
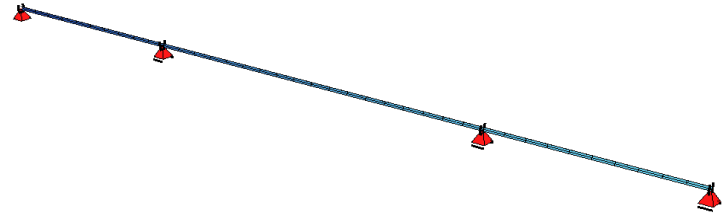


Figura A.1.8- Evolução da categoria ótima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S..

Quadro A.1.14 - Resumo de esforços ELU, sobrecarga e oscilação de momentos flectores

Resumo de Esforços - ΔM -kN.m									Modelo Numérico
VÃO PRINCIPAL 45 m									
Caso	Vano Lateral				Vão Principal				
	25 m	30 m	35 m	45 m	25 m	30 m	35 m	45 m	
M _d (ELU)	15340	25361	36275	61604	38564	37901	36331	30288	
M _{max} LM1	9293	11818	14393	20265	13116	13561	13964	14661	
ΔM (FLM3)	2756	3166	3575	4404	2716	2888	3082	3475	
ΔM (FLM4a)	1382	1603	1750	2123	1390	1460	1531	1676	
ΔM (FLM4b)	2057	2291	2574	3155	2021	2154	2287	2561	
ΔM (FLM4c)	2786	3224	3661	4534	2782	2960	3143	3533	
ΔM (FLM4d)	2130	2478	2821	3503	2151	2306	2464	2787	
ΔM (FLM4e)	2338	2736	3142	3949	2423	2603	2785	3140	



Quadro A.1.16 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																																	
VÃO PRINCIPAL 45 m																																	
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal																			
	(·10 ⁶ vp/ano)	25 m				30 m				35 m				45 m				25 m				30 m				35 m				45 m			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD					
FLM3	2	93				108				122				84				80				99				105				118			
FLM4		68	86	95	78	99	110	88	113	125	61	78	86	59	74	82	73	91	101	78	97	107	87	109	120								
FLM3	0,5	82				94				106				73				70				86				92				103			
FLM4		52	68	73	60	78	85	68	89	96	47	62	67	45	59	64	56	73	79	58	78	84	67	87	95								
FLM3	0,125	62				71				81				55				53				65				70				78			
FLM4		39	52	57	45	60	66	51	68	74	35	47	52	34	45	49	42	55	60	44	59	64	49	66	72								
FLM3	0,05	52				60				67				46				44				54				58				65			
FLM4		31	40	45	35	47	52	39	53	59	27	36	41	27	35	39	33	43	48	34	46	51	38	51	57								

Quadro A.1.17 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão.

Método Simplificado do EC3-2																										
VÃO PRINCIPAL 45 m																										
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão Lateral												Vão Principal												
		25 m			30 m			35 m			45 m			25 m			30 m			35 m			45 m			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	
FLM3	2	76			110			98			67			64			79			85			96			
FLM4		76	76	76	110	110	110	98	98	98	65	67	67	62	64	64	76	79	79	81	85	85	92	96	96	
FLM3	0,5	76			110			98			67			64			79			85			96			
FLM4		60	76	76	86	110	110	75	96	98	49	63	67	47	60	64	58	74	79	62	79	85	69	89	96	
FLM3	0,125	69			98			86			56			54			66			70			80			
FLM4		45	58	64	65	83	92	56	73	80	37	48	52	35	46	50	44	56	61	47	60	66	53	68	74	
FLM3	0,05	57			82			72			47			45			55			59			66			
FLM4		38	49	53	54	69	76	47	60	66	31	40	43	29	38	41	36	47	51	39	50	55	44	56	62	

Quadro A.1.15 - Resumo das características seccionais da secção de vão lateral e central.

Vão Central 45 m									
Secção Real					Secção Estrutural Equivalente				
Características Seccionais	Vão Lateral – S1								
	25 m		30 m		35 m		45 m		
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	
H _{Total} [cm]	170		170		170		170		
H _{Metal} [cm]	142		142		142		142		
Laje [cm]	1235	28	1235	28	1235	28	1235	28	
^{2x} Plat. Superior [cm]	80	1,5	80	1,5	80	1,5	80	1,5	
^{2x} Célula Sup [cm]	2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5	
^{2x} Alma [cm]	2,2	139,5	2,2	139,5	2,2	139,5	2,2	138,5	
Plat. Inf. [cm]	500	1	500	1	500	1	500	2	
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	13640436		13640436		13640436		22446565		
Y _G [cm]	30,16		30,16		30,16		40,63		
Características Seccionais	Vão Central – S2								
	25 m		30 m		35 m		45 m		
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	
H _{Total} [cm]	170		170		170		170		
H _{Metal} [cm]	142		142		142		142		
Laje [cm]	1235	28	1235	28	1235	28	1235	28	
^{2x} Plat. Superior [cm]	80	1,5	80	1,5	80	1,5	80	1,5	
^{2x} Célula Sup. [cm]	2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5	
^{2x} Alma [cm]	2,2	139,3	2,2	139,5	2,2	139,5	2,2	13,5	
Plat. Inf. [cm]	500	1,2	500	1	500	1	500	1	
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	15525987		13640436		13640436		13640436		
Y _G [cm]	32,40		30,16		30,16		30,16		

Quadro A.1.18 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																													
VÃO PRINCIPAL 45 m																													
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal															
	(·10 ⁶ vp/año)	25 m			30 m			35 m			45 m			25 m			30 m			35 m			45 m						
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD				
FLM3	2		93				108				122				84				80				99			105			118
FLM4		68	86	95	78	99	110	88	113	125	61	78	86	59	74	82	73	91	101	78	97	107	87	109	120				
FLM3	0,5		82				94				106				73				70				86			92			103
FLM4		52	68	73	60	78	85	68	89	96	47	62	67	45	59	64	56	73	79	58	78	84	67	87	95				
FLM3	0,125		62				71				81				55				53				65			70			78
FLM4		39	52	57	45	60	66	51	68	74	35	47	52	34	45	49	42	55	60	44	59	64	49	66	72				
FLM3	0,05		52				60				67				46				44				54			58			65
FLM4		31	40	45	35	47	52	39	53	59	27	36	41	27	35	39	33	43	48	34	46	51	38	51	57				

Quadro A.1.19 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão livre da influência do coeficiente limitativo de dano λ_{MAX}.

Método Simplificado do EC3-2 – Sem λ_{MAX}																										
VÃO PRINCIPAL 45 m																										
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral														Vão Principal										
	(·10 ⁶ vp/año)	25 m			30 m			35 m			45 m			25 m			30 m			35 m			45 m			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	
FLM3	2		120			135			149			98			94			116			123			139		
FLM4		79	102	112	89	114	125	99	127	138	65	83	91	62	79	87	76	98	107	82	104	114	92	118	129	
FLM3	0,5		91			102			113			75			71			88			94			105		
FLM4		60	77	84	68	87	95	75	96	105	49	63	69	47	60	66	58	74	81	62	79	87	69	89	98	
FLM3	0,125		69			78			86			57			54			66			71			80		
FLM4		46	58	64	51	66	72	57	73	80	37	48	53	35	46	50	44	56	62	47	60	66	53	68	74	
FLM3	0,05		58			65			72			47			45			55			59			67		
FLM4		38	49	54	43	55	60	47	61	66	31	40	44	30	38	42	36	47	51	39	50	55	44	57	62	

Quadro A.1.20 - Comparação entre resultados obtidos através do MDA e Método Simplificado recalibrando o coeficiente λ_{MAX} em função da intensidade de tráfego.

Método Simplificado do EC3-2 – com λ_{MAX} EXPERIMENTAL																	
VÃO PRINCIPAL 45 m																	
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral								Vão Principal							
	(·10 ⁶ vp/año)	25 m		30 m		35 m		45 m		25 m		30 m		35 m		45 m	
		MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.
FLM3	2	93	100	108	115	122	130	84	89	80	85	99	105	105	112	118	126
FLM3	0,5	82	76	94	87	106	98	73	68	70	68	86	80	92	85	103	96
FLM3	0,125	62	58	71	66	81	75	55	51	53	49	65	60	70	64	78	72
FLM3	0,05	52	48	60	55	67	62	46	43	44	41	54	50	58	55	65	60

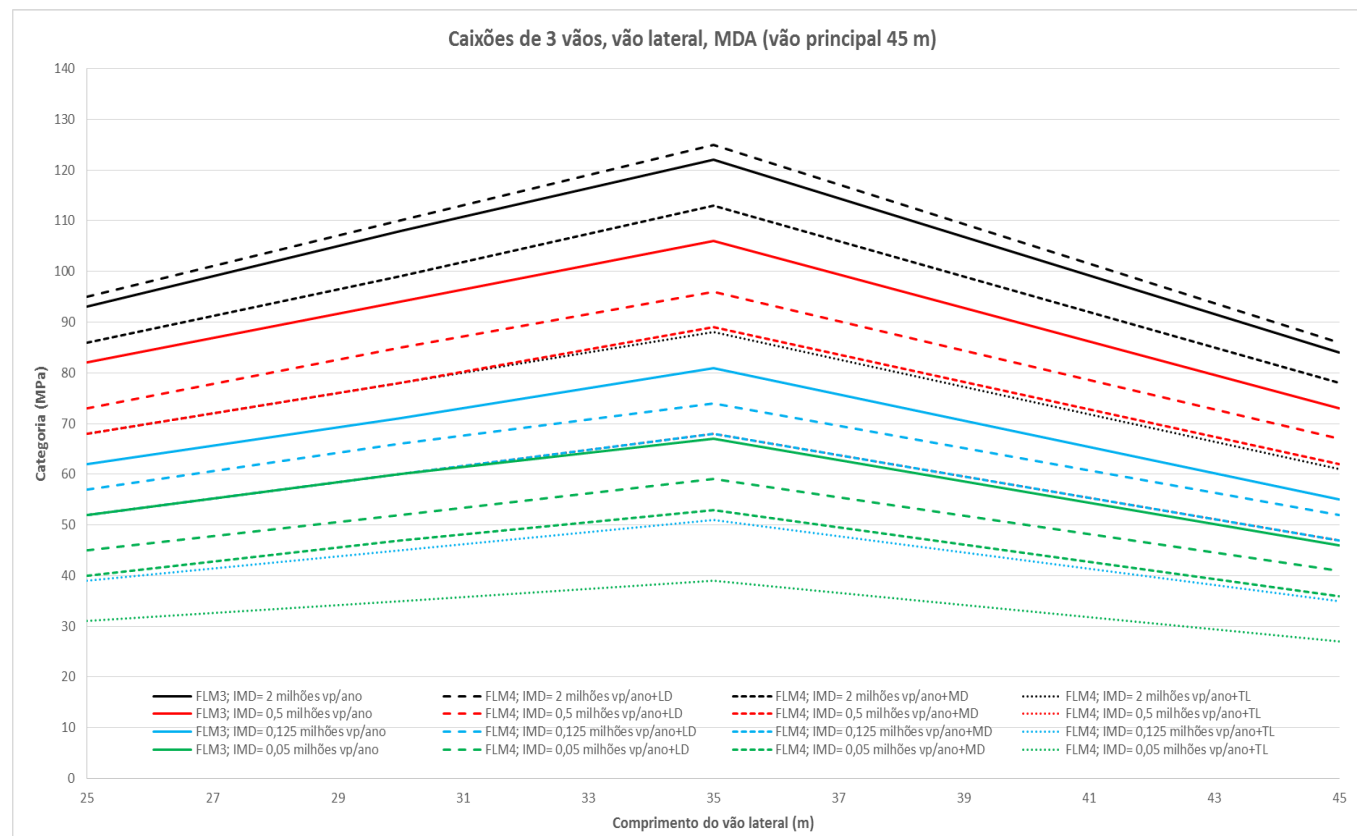


Figura A.1.9- - Evolução da categoria ótima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA

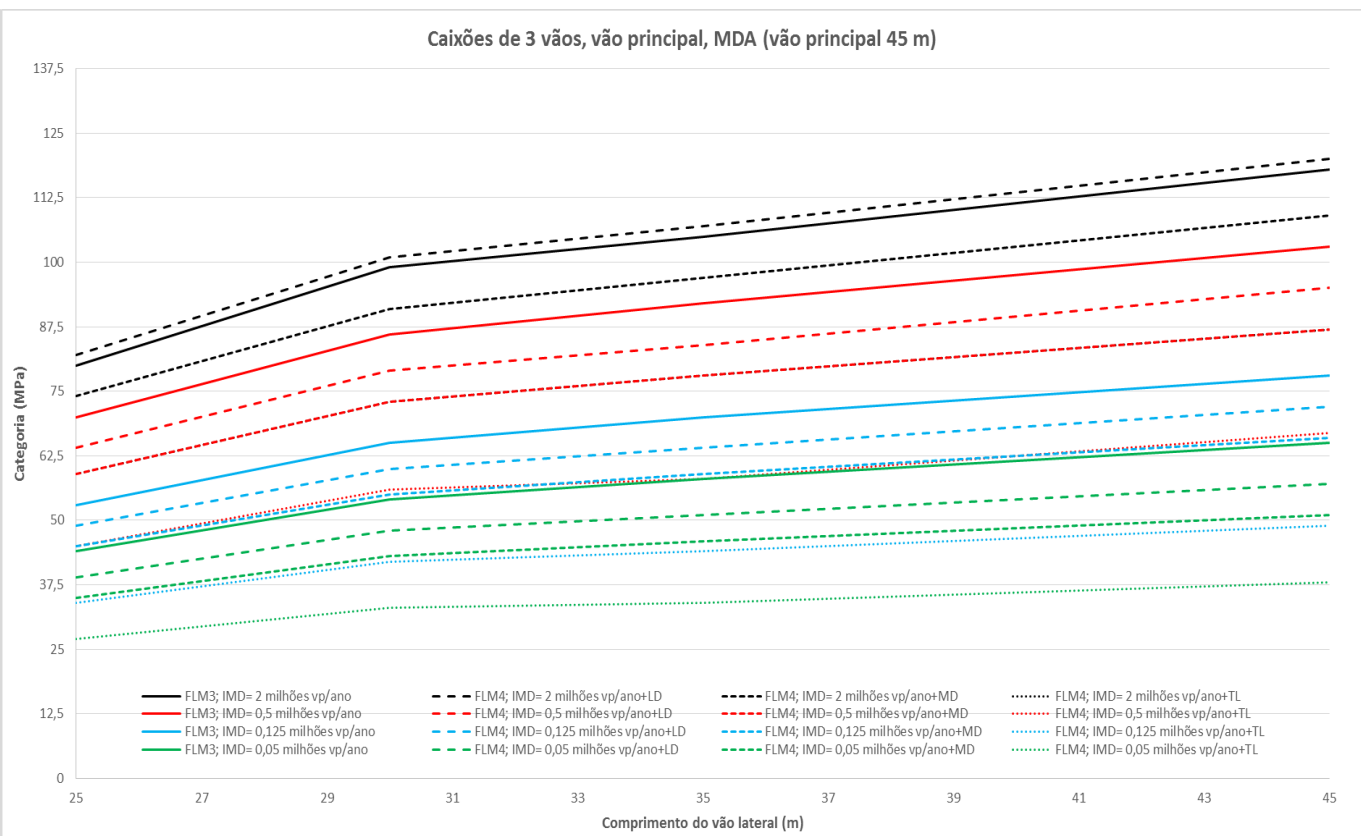


Figura A.1.10- - Evolução da categoria ótima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA

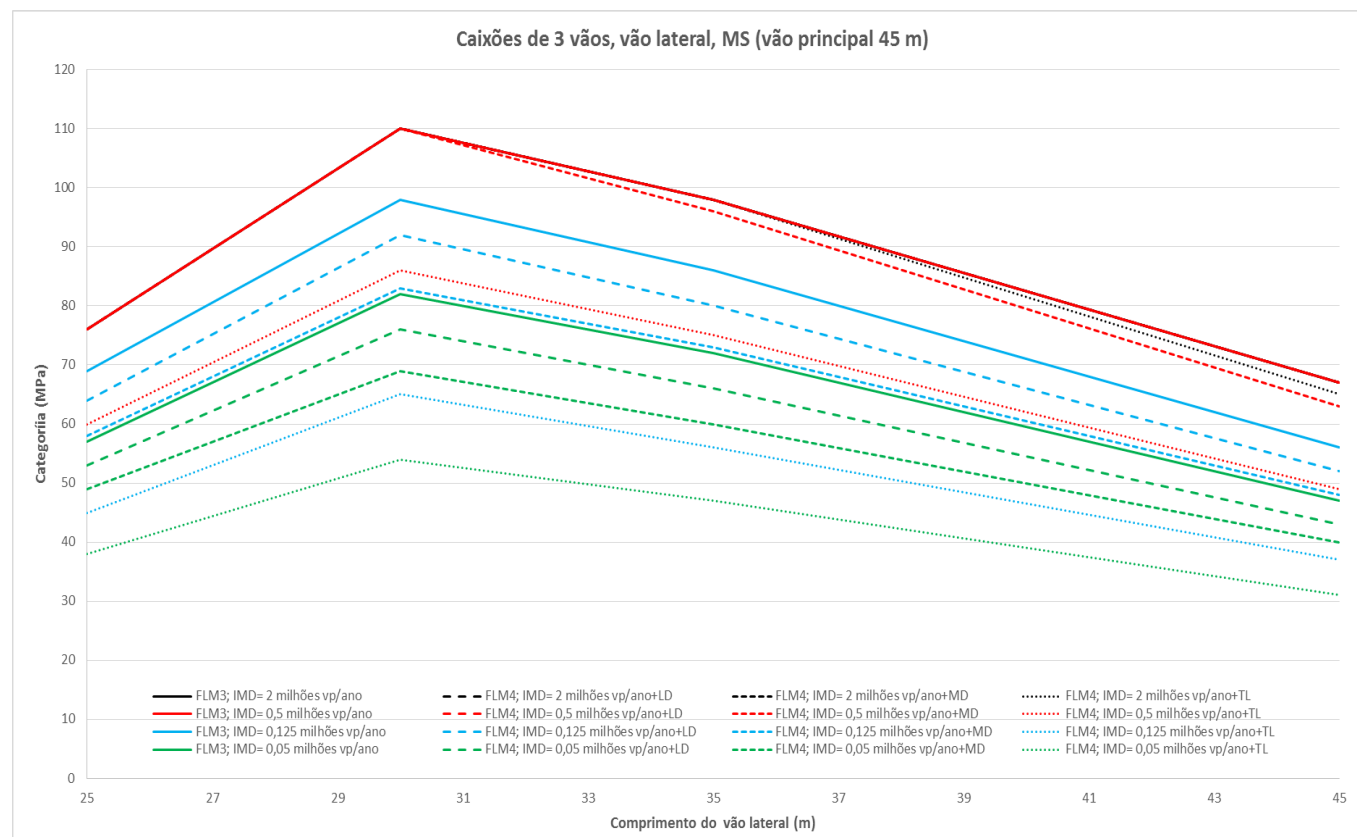


Figura A.1.11-- Evolução da categoria ótima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

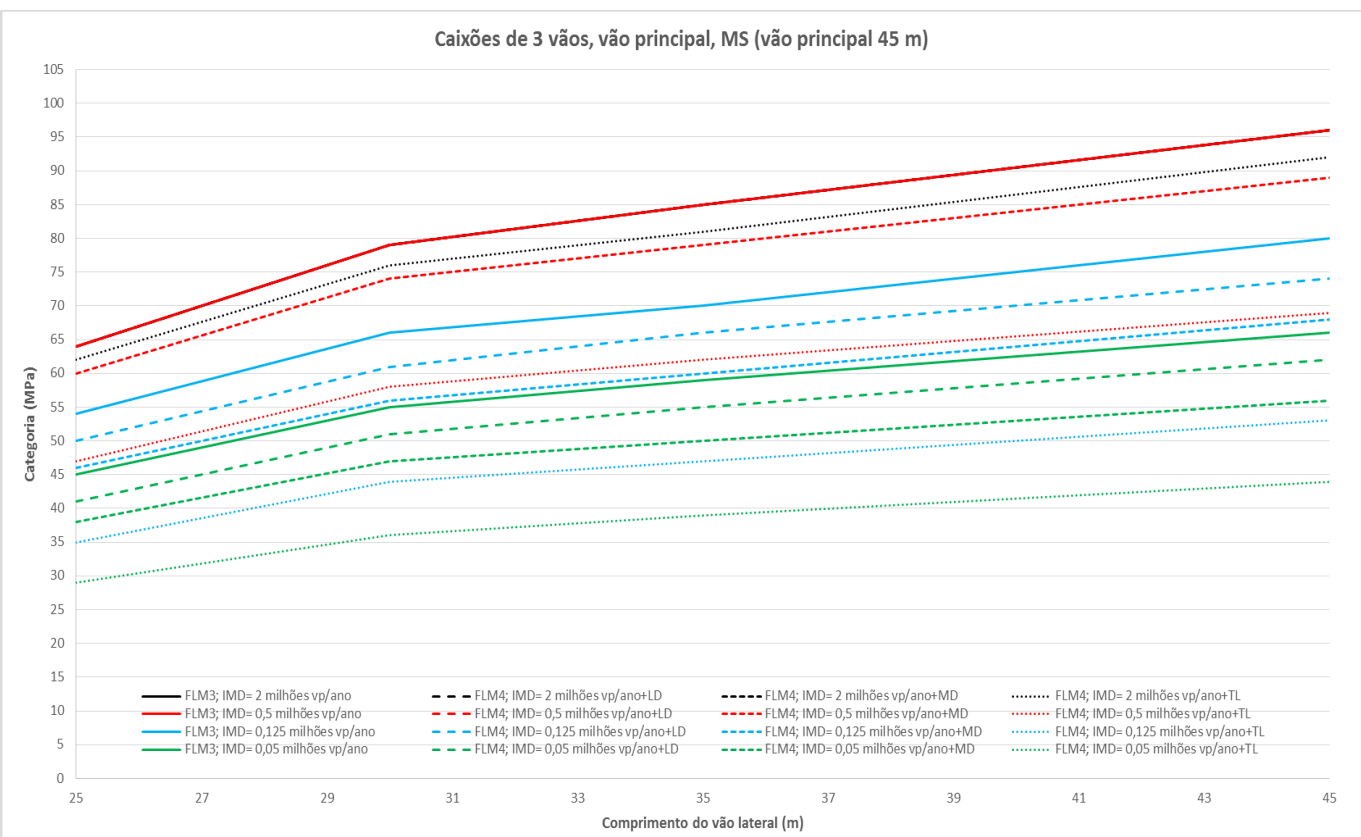
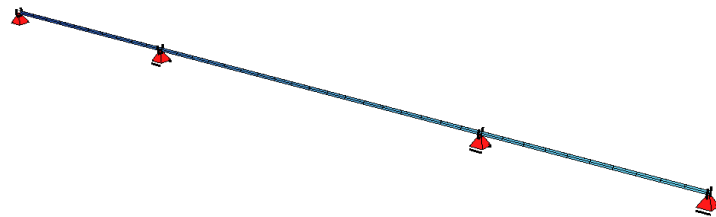
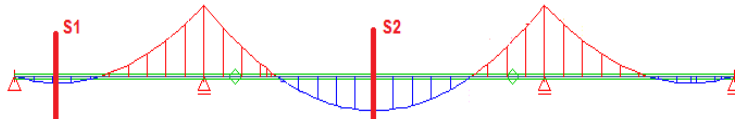


Figura A.1.12- - Evolução da categoria ótima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

Quadro A.1.21 - Resumo de esforços ELU, sobrecarga e oscilação de momentos flectores

Resumo de Esforços - ΔM -kN.m									Modelo Numérico
VÃO PRINCIPAL 60 m									
Caso	Vano Lateral				Vão Principal				
	36 m	40 m	45 m	60 m	36 m	40 m	45 m	60 m	
M _d (ELU)	29933	40655	54579	102870	63350	62402	60404	48653	
M _{max} LM1	15475	17718	20873	31256	20237	20657	21147	22425	
ΔM (FLM3)	4107	4435	4880	6192	3967	4118	4313	4902	
ΔM (FLM4a)	1956	2153	2310	2813	1885	1941	2012	2229	
ΔM (FLM4b)	2953	3179	3464	4168	2877	2979	3100	3473	Localização das secções analisadas
ΔM (FLM4c)	4225	4579	5016	6262	4034	4193	4393	5004	
ΔM (FLM4d)	3264	3535	3873	4903	3183	3310	3469	3954	
ΔM (FLM4e)	3660	3991	4406	5588	3602	3739	3913	4446	

								
---	--	--	--	--	--	--	--	--

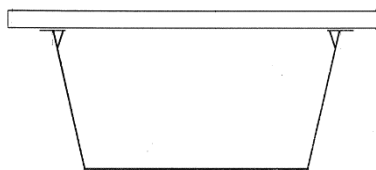
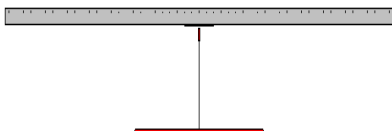
Quadro A.1.23 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																									
VÃO PRINCIPAL 60 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral										Vão Principal													
		36 m		40 m		45 m		60 m		36 m		40 m		45 m		60 m									
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	91				98				109				65		77		80		84		109			
FLM4		67	85	94	72	92	102	79	101	112	47	60	66	56	71	78	58	74	81	61	77	85	79	101	111
FLM3	0,5	80				86				95		57		67		70		73		95					
FLM4		51	67	73	56	73	79	61	80	86	36	47	52	43	56	62	45	58	64	47	61	67	62	80	88
FLM3	0,125	61				65				72		43		51		53		55		72					
FLM4		38	51	56	41	56	61	45	61	67	26	36	40	32	43	47	33	45	49	35	47	51	45	61	67
FLM3	0,05	50				54				60		36		43		44		46		60					
FLM4		29	40	45	32	43	48	35	43	48	21	28	32	25	33	37	26	35	39	27	36	41	34	47	53

Quadro A.1.24 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão.

Método Simplificado do EC3-2																									
VÃO PRINCIPAL 60 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão Lateral										Vão Principal													
		36 m		40 m		45 m		60 m		36 m		40 m		45 m		60 m									
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	74				80				88		53		62		64		67		88					
FLM4		74	74	74	78	80	80	84	88	88	47	53	53	55	62	62	57	64	64	60	67	67	78	88	88
FLM3	0,5	74				80				88		53		62		64		67		88					
FLM4		56	72	74	59	76	80	64	82	88	36	46	50	42	54	59	44	56	62	46	59	64	59	76	84
FLM3	0,125	64				68				73		41		48		50		52		68					
FLM4		42	54	59	45	58	63	48	62	68	27	35	38	32	41	45	33	43	46	35	44	49	45	58	64
FLM3	0,05	53				56				61		34		40		42		44		57					
FLM4		35	45	60	37	48	53	40	52	57	23	29	32	26	34	37	27	35	39	29	37	41	38	48	53

Quadro A.1.22 - Resumo das características seccionais da secção de vão lateral e central.

Vão Central 60 m								
Secção Real				Secção Estrutural Equivalente				
								
Características Seccionais	Vão Lateral – S1							
	36 m		40 m		45 m		60 m	
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]
H _{Total} [cm]	240		240		240		240	
H _{Metal} [cm]	212		212		212		212	
Laje [cm]	1235	28	1235	28	1235	28	1235	28
² xPlat. Superior [cm]	80	1,5	80	1,5	80	1,5	80	1,5
² xCélula Sup.[cm]	2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5
² xAlma [cm]	2,2	209,5	2,2	209,5	2,2	209,5	2,2	208
Plat. Inf.[cm]	500	1	500	1	500	1	500	2,5
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	29949151		29949151		29949151		56140772	
Y _G [cm]	40,07		40,07		40,07		61,26	
Características Seccionais	Vão Central – S2							
	36 m		40 m		45 m		60 m	
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]
H _{Total} [cm]	240		240		240		240	
H _{Metal} [cm]	212		212		212		212	
Laje [cm]	1235	28	1235	28	1235	28	1235	28
² xPlat. Superior [cm]	80	1,5	80	1,5	80	1,5	80	1,5
² xCélula Sup [cm]	2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5
² xAlma [cm]	2,2	209,3	2,2	209,3	2,2	209,3	2,2	209,5
Plat. Inf.[cm]	500	1,2	500	1,2	500	1,2	500	1
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	33823381		33823381		33823381		29949151	
Y _G [cm]	43,19		43,19		43,19		40,07	

Quadro A.1.25 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																									
VÃO PRINCIPAL 60 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral												Vão Principal											
		36 m			40 m			45 m			60 m			36 m			40 m			45 m			60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	91			98			109			65			77			80			84			109		
FLM4		67	85	94	72	92	102	79	101	112	47	60	66	56	71	78	58	74	81	61	77	85	79	101	111
FLM3	0,5	80			86			95			57			67			70			73			95		
FLM4		51	67	73	56	73	79	61	80	86	36	47	52	43	56	62	45	58	64	47	61	67	62	80	88
FLM3	0,125	61			65			72			43			51			53			55			72		
FLM4		38	51	56	41	56	61	45	61	67	26	36	40	32	43	47	33	45	49	35	47	51	45	61	67
FLM3	0,05	50			54			60			36			43			44			46			60		
FLM4		29	40	45	32	43	48	35	43	48	21	28	32	25	33	37	26	35	39	27	36	41	34	47	53

Quadro A.1.26 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão livre da influência do coeficiente limitativo de dano λ_{MAX}.

Método Simplificado do EC3-2 – Sem λ _{MAX}																									
VÃO PRINCIPAL 60 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral												Vão Principal											
		36 m			40 m			45 m			60 m			36 m			40 m			45 m			60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	112			118			127			71			84			87			91			119		
FLM4		74	95	104	78	100	110	84	108	118	47	60	66	56	71	78	58	74	81	60	78	85	79	101	110
FLM3	0,5	85			90			96			54			64			66			69			91		
FLM4		56	72	79	59	76	83	64	82	90	36	46	50	42	54	59	44	56	62	46	59	64	60	77	84
FLM3	0,125	64			68			73			41			48			50			53			69		
FLM4		43	55	60	45	58	63	48	62	68	27	35	38	32	41	45	33	43	47	35	45	49	45	58	64
FLM3	0,05	54			57			61			34			40			42			44			57		
FLM4		36	46	50	38	48	53	40	52	57	23	29	32	27	34	38	28	36	39	29	37	41	38	48	53

Quadro A.1.27 - Comparação entre resultados obtidos através do MDA e Método Simplificado recalibrando o coeficiente λ_{MAX} em função da intensidade de tráfego.

Método Simplificado do EC3-2 – com λ _{MAX} EXPERIMENTAL																			
VÃO PRINCIPAL 60 m																			
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral								Vão Principal									
		36 m		40 m		45 m		60 m		36 m		40 m		45 m		60 m			
		MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.
FLM3	2	91	97	98	105	109	116	65	69	77	82	80	85	84	89	109	116		
FLM3	0,5	80	74	86	80	95	88	57	53	67	62	70	64	73	68	95	88		
FLM3	0,125	61	56	65	60	72	66	43	40	51	47	53	49	55	51	72	67		
FLM3	0,05	50	47	54	50	60	55	36	33	43	39	44	41	46	43	60	56		

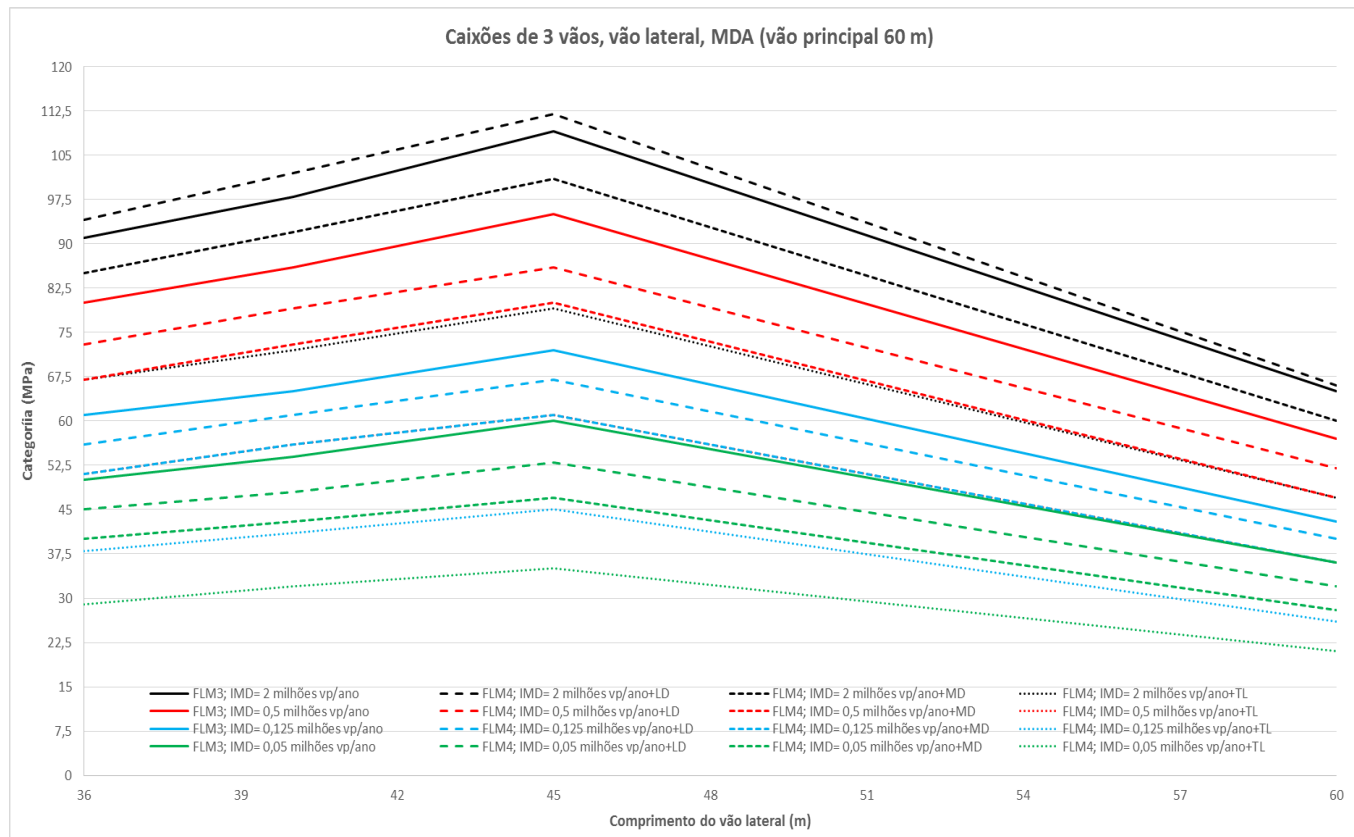


Figura A.1.13- Evolução da categoria óptima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA

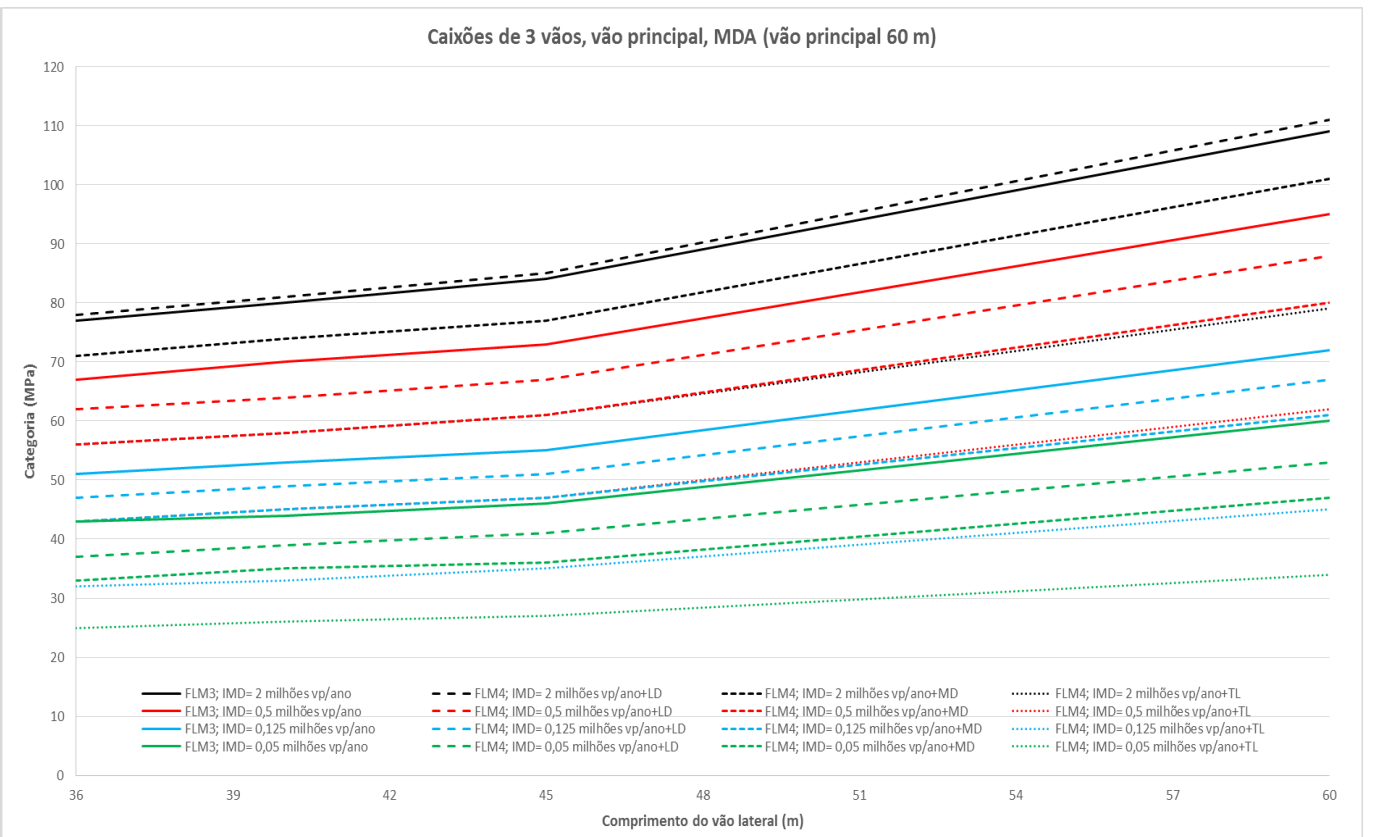


Figura A.1.14- Evolução da categoria óptima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA

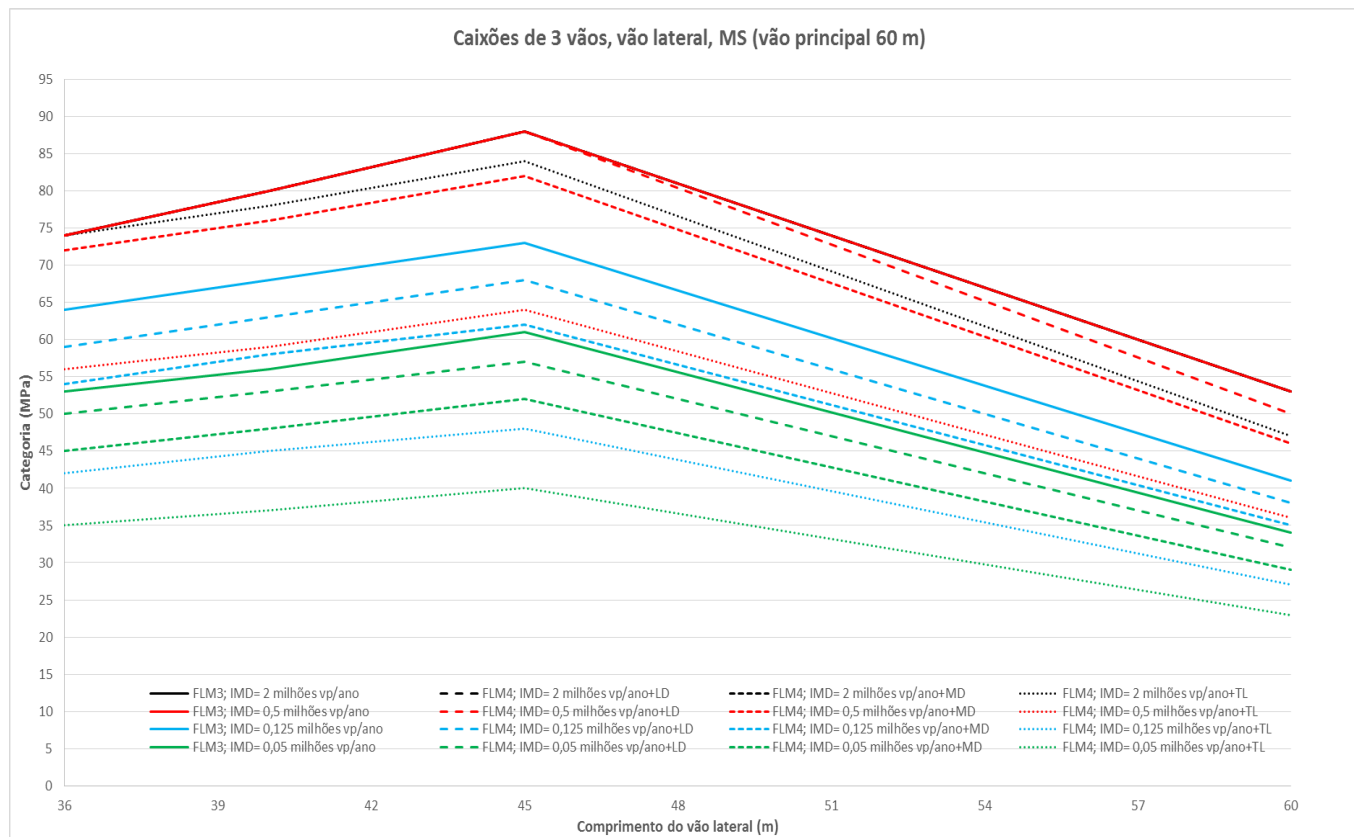


Figura A.1.15- Evolução da categoria óptima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

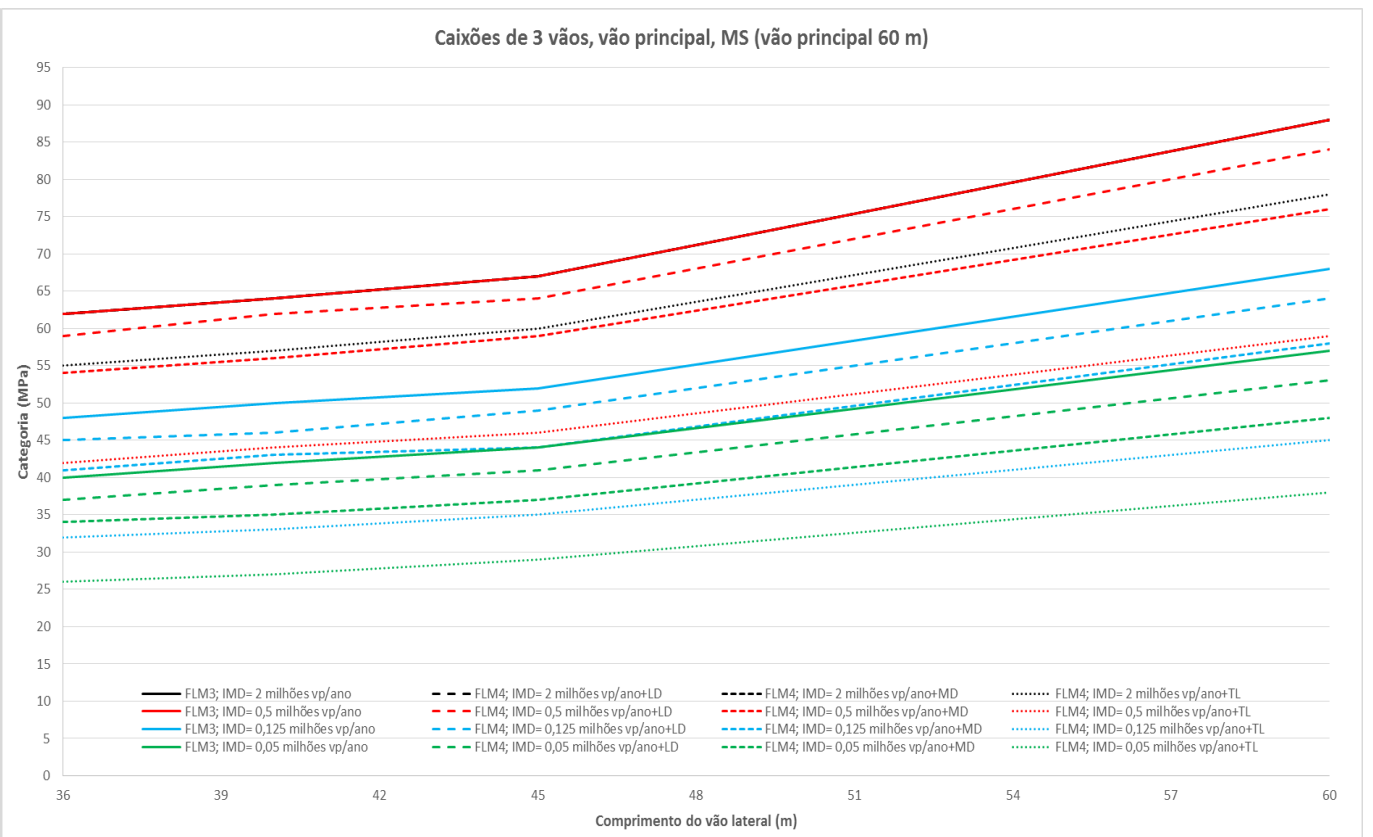
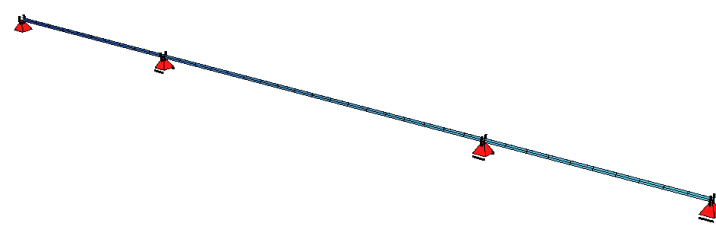


Figura A.1.16- Evolução da categoria óptima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

Quadro A.1.28 - Resumo de esforços ELU, sobrecarga e oscilação de momentos flectores

Resumo de Esforços - ΔM -kN.m									Modelo Numérico
VÃO PRINCIPAL 75 m									
Caso	Vano Lateral				Vão Principal				
	45 m	50 m	60 m	75 m	45 m	50 m	60 m	75 m	
M _d (ELU)	43367	59382	94434	154750	94941	93394	87581	71644	
M _{max} LM1	21447	24911	32106	44467	28427	29040	30162	31628	
ΔM (FLM3)	5380	5788	6605	7873	5163	5355	5746	6337	
ΔM (FLM4a)	2284	2678	3018	3503	2351	2421	2564	2782	
ΔM (FLM4b)	3632	3984	4585	5295	3646	3766	4010	4384	Localização das secções analisadas
ΔM (FLM4c)	5418	5823	6767	8108	5264	5462	5864	6476	
ΔM (FLM4d)	4235	4577	5285	6335	4159	4316	4637	5093	
ΔM (FLM4e)	4804	5177	5998	7239	4696	4870	5221	5757	

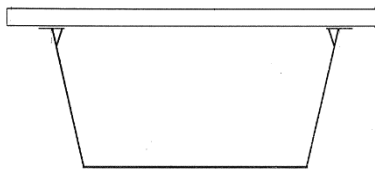
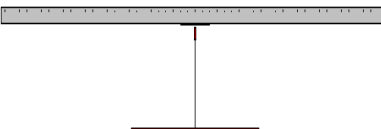
Quadro A.1.30 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																									
VÃO PRINCIPAL 75 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão Lateral												Vão Principal											
		45				50				60				75				45				50			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	108				116				77				56				60				62			
FLM4		78	98	109	84	106	117	56	71	79	41	52	58	44	55	61	46	58	64	61	77	85	68	86	95
FLM3	0,5	94				101				67				49				53				54			
FLM4		60	78	85	65	84	92	43	56	62	32	41	45	34	44	48	35	46	50	47	61	67	53	68	75
FLM3	0,125	72				77				51				37				40				41			
FLM4		43	59	65	47	64	70	31	43	47	23	31	35	25	34	37	26	35	38	34	47	51	38	52	57
FLM3	0,05	60				64				42				31				33				35			
FLM4		33	46	52	36	49	56	24	33	38	18	24	27	19	26	29	20	27	30	27	36	41	29	40	45

Quadro A.1.31 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão.

Método Simplificado do EC3-2																									
VÃO PRINCIPAL 75 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão Lateral												Vão Principal											
		45 m				50 m				60 m				75 m				45 m				50 m			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	87				94				62				45				48				50			
FLM4		84	87	87	88	94	94	55	62	62	37	45	45	40	48	48	42	50	50	56	68	68	62	75	75
FLM3	0,5	87				94				62				43				46				48			
FLM4		63	81	87	67	85	94	42	54	59	28	36	40	30	39	43	32	41	45	42	54	59	47	61	66
FLM3	0,125	73				76				48				33				35				36			
FLM4		48	62	68	51	65	71	32	41	45	22	27	30	23	30	33	24	31	34	32	41	45	36	46	51
FLM3	0,05	61				64				40				27				29				30			
FLM4		40	52	56	42	54	59	26	34	37	20	23	25	20	25	27	20	26	28	27	34	37	30	38	42

Quadro A.1.29 - Resumo das características seccionais da secção de vão lateral e central.

Vão Central 75 m									
Secção Real				Secção Estrutural Equivalente					
									
Características Seccionais		Vão Lateral – S1							
		45 m		50 m		60 m		75 m	
		B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]
H _{Total} [cm]		260		260		260		260	
H _{Metal} [cm]		232		232		232		232	
Laje [cm]		1235	28	1235	28	1235	28	1235	28
^{2x} Plat. Superior [cm]		80	1,5	80	1,5	80	1,5	80	3,0
^{2x} Célula Sup.[cm]		2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5
^{2x} Alma [cm]		2,2	229,5	2,2	229,5	2,2	228,5	2,4	225,5
Plat. Inf.[cm]		500	1	500	1	500	2	500	3,5
I _{Secção Mista} [cm ⁴]		36001373		36001373		57396890		84494538	
Y _G [cm]		43,12		43,12		58,94		78,30	
Características Seccionais		Vão Central – S2							
		45 m		50 m		60 m		75 m	
		B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]
H _{Total} [cm]		260		260		260		260	
H _{Metal} [cm]		232		232		232		232	
Laje [cm]		1235	28	1235	28	1235	28	1235	28
^{2x} Plat. Superior [cm]		80	1,5	80	1,5	40	1,5	40	1,5
^{2x} Célula Sup.[cm]		2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5	2,11	23,5
^{2x} Alma [cm]		2,2	228,5	2,2	228,5	2,4	229	2,2	229
Plat. Inf.[cm]		500	2	500	2	500	1,5	500	1,5
I _{Secção Mista} [cm ⁴]		57396890		57396890		47723391		47723391	
Y _G [cm]		58,94		58,94		52,00		52,00	

Quadro A.1.32 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																															
VÃO PRINCIPAL 75 m																															
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal																	
	(·10 ⁶ vp/año)	45			50			60			75			45			50			60			75								
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD						
FLM3	2		108				116				77				56				60				62				83				93
FLM4		78	98	109	84	106	117	56	71	79	41	52	58	44	55	61	46	58	64	61	77	85	68	86	95						
FLM3	0,5		94				101				67				49				53				54				73				81
FLM4		60	78	85	65	84	92	43	56	62	32	41	45	34	44	48	35	46	50	47	61	67	53	68	75						
FLM3	0,125		72				77				51				37				40				41				55				62
FLM4		43	59	65	47	64	70	31	43	47	23	31	35	25	34	37	26	35	38	34	47	51	38	52	57						
FLM3	0,05		60				64				42				31				33				35				46				52
FLM4		33	46	52	36	49	56	24	33	38	18	24	27	19	26	29	20	27	30	27	36	41	29	40	45						

Quadro A.1.33 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão livre da influência do coeficiente limitativo de dano λ_{MAX}.

Método Simplificado do EC3-2 – Sem λ_{MAX}																									
VÃO PRINCIPAL 75 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal											
	(·10 ⁶ vp/año)	45			50			60			75			45			50			60			75		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	127			133			84			56			61			63			84			94		
FLM4		84	107	117	88	113	123	55	71	78	37	48	52	40	52	56	42	54	58	56	76	78	62	80	88
FLM3	0,5	96			101			64			43			46			48			64			71		
FLM4		63	81	89	67	85	94	42	54	59	28	36	40	30	39	43	32	41	44	42	54	59	47	61	67
FLM3	0,125	73			77			48			32			35			36			48			54		
FLM4		48	62	68	51	65	71	32	41	45	21	28	30	23	30	33	24	31	34	32	41	45	36	46	51
FLM3	0,05	61			64			40			27			29			30			40			45		
FLM4		40	52	56	42	54	59	27	34	37	18	23	25	19	25	27	20	26	28	27	34	38	30	38	42

Quadro A.1.34 - Comparação entre resultados obtidos através do MDA e Método Simplificado recalibrando o coeficiente λ_{MAX} em função da intensidade de tráfego.

Método Simplificado do EC3-2 – com λ_{MAX} EXPERIMENTAL																	
VÃO PRINCIPAL 75 m																	
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral								Vão Principal							
	(·10 ⁶ vp/año)	45 m		50 m		60 m		75 m		45 m		50 m		60 m		75 m	
		MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.
FLM3	2	108	115	116	124	77	82	56	59	60	64	62	66	83	89	93	99
FLM3	0,5	94	87	101	94	67	62	49	45	53	48	54	50	73	67	81	75
FLM3	0,125	72	66	77	71	51	47	37	34	40	37	41	38	55	51	62	57
FLM3	0,05	60	55	64	59	42	39	31	29	33	31	35	32	46	43	52	48

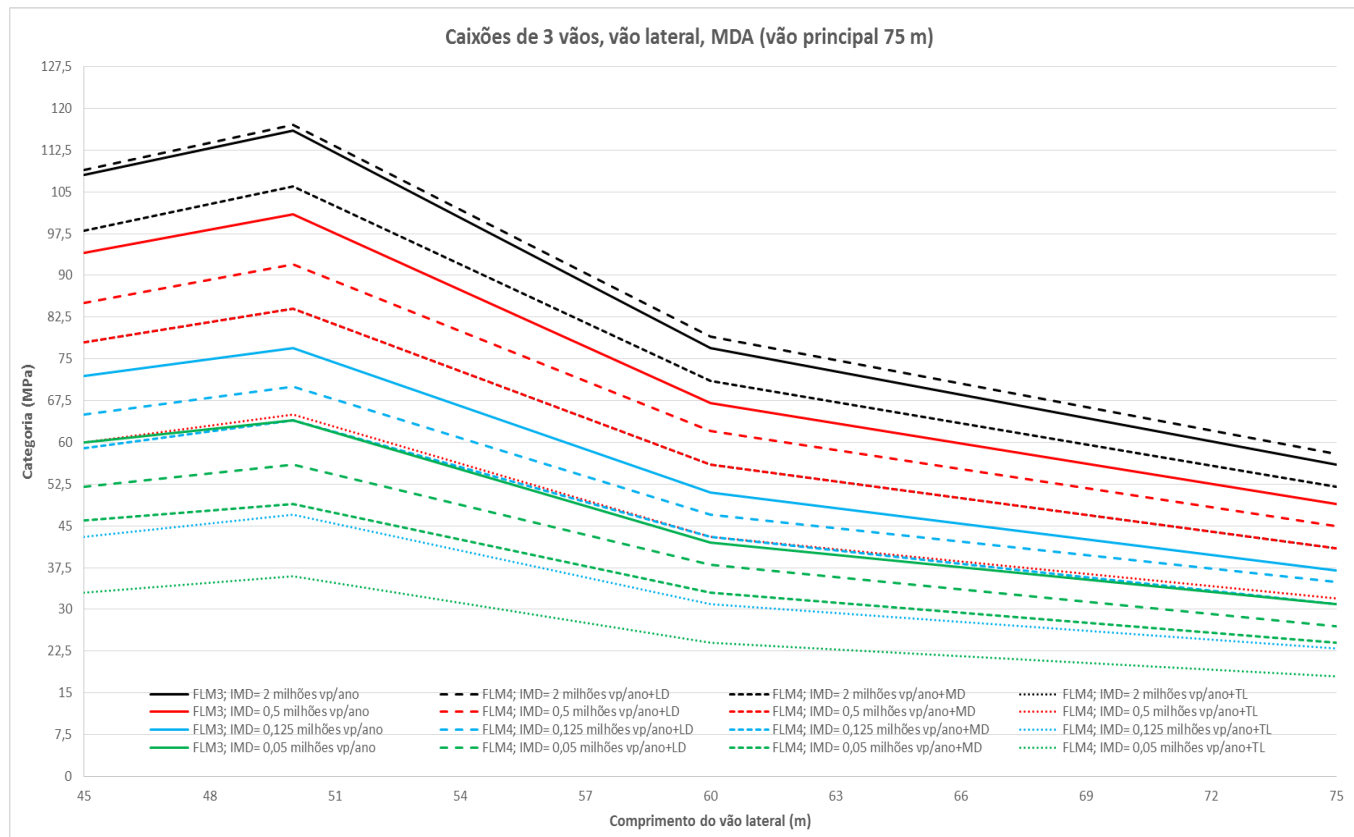


Figura A.1.17- Evolução da categoria óptima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA

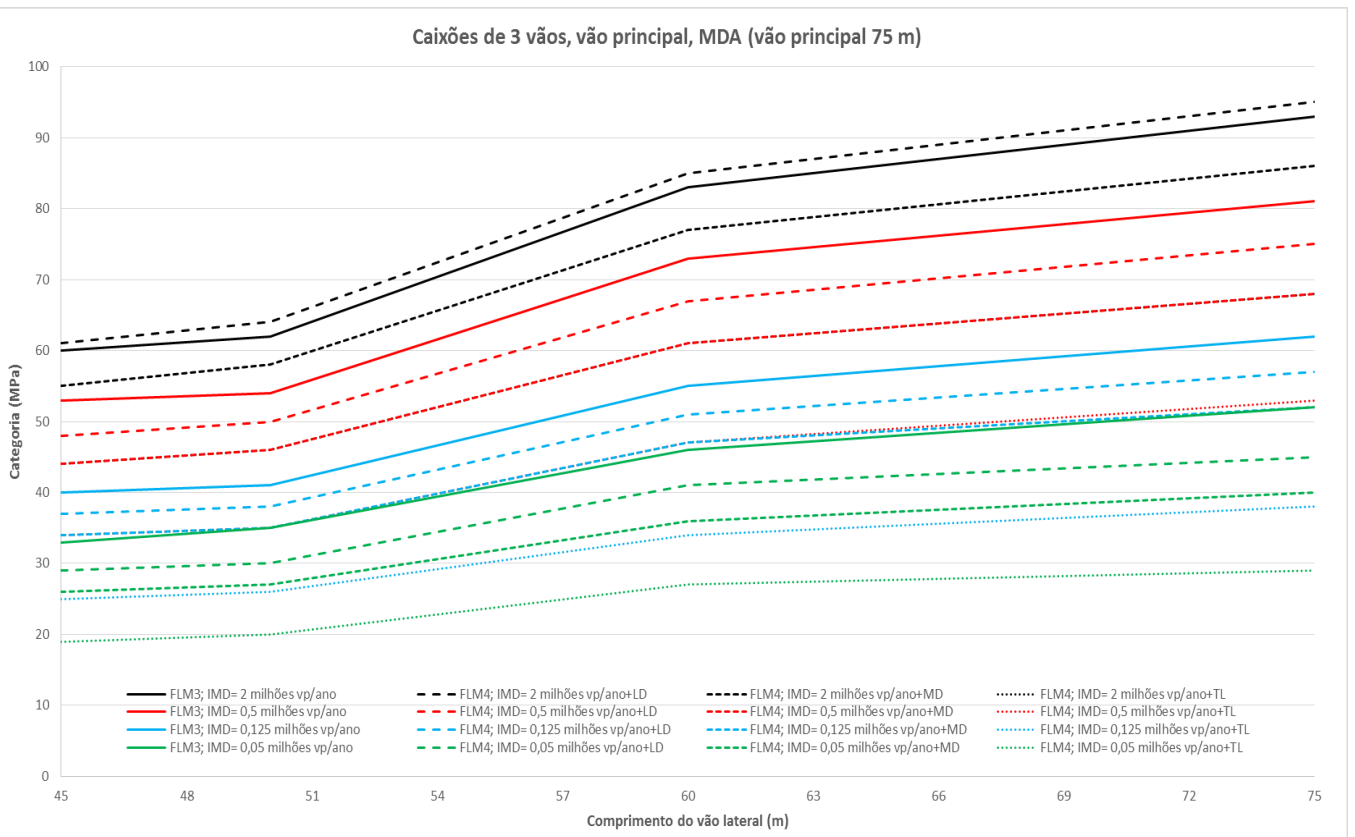


Figura A.1.18- Evolução da categoria óptima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA

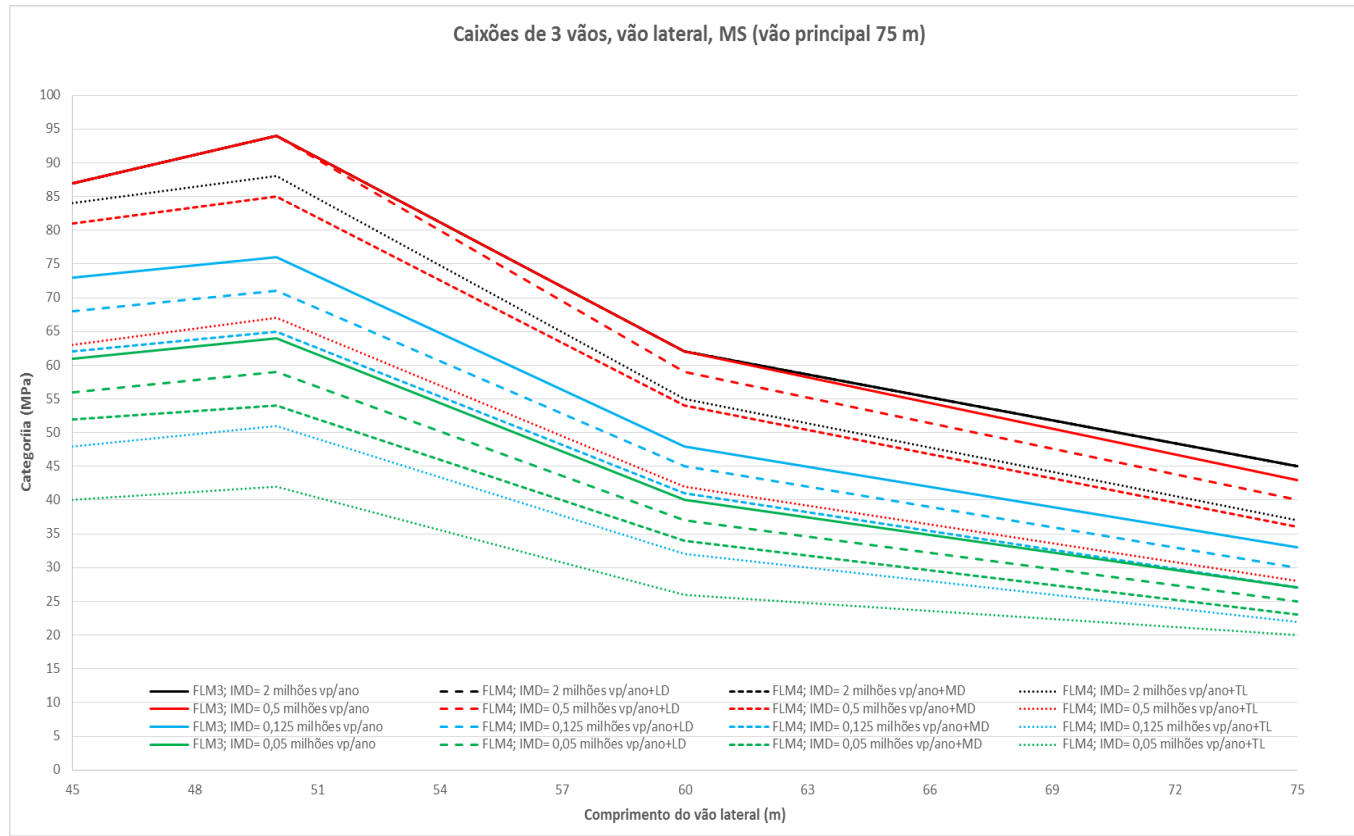


Figura A.1.19- Evolução da categoria óptima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

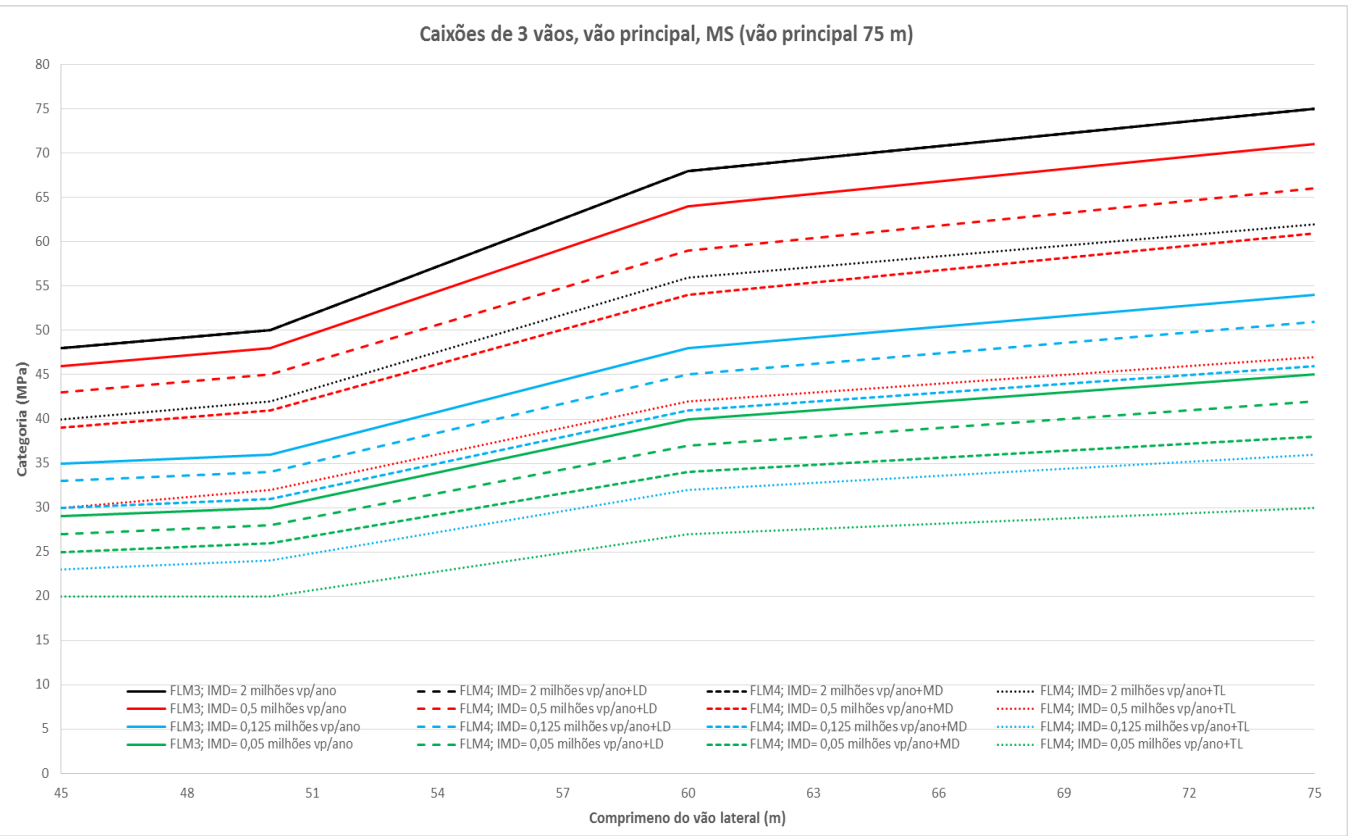
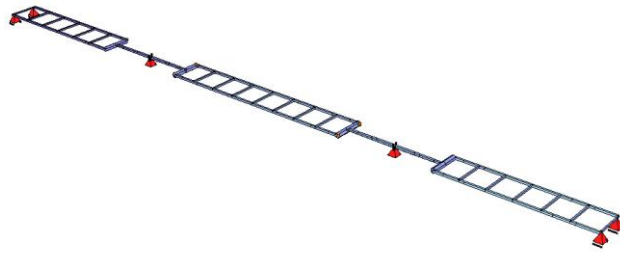
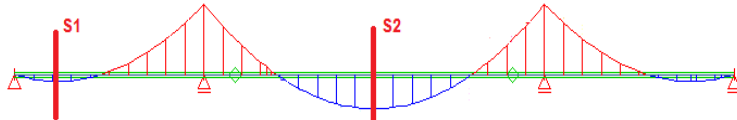


Figura A.1.20- Evolução da categoria óptima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

Quadro A.1.35 – Resumo de esforços ELU, sobrecarga e oscilação de momentos flectores.

Resumo de Esforços - ΔM -kN.m									Modelo Numérico
VÃO PRINCIPAL 30 m									
Caso	Vão Lateral				Vão Principal				
	18 m	20 m	22,5 m	30 m	18 m	20 m	22,5 m	30 m	
M _d (ELU)	6394	7885	9416	16647	11572	11392	11208	8950	
M _{max} LM1	3468	3923	4357	6407	4500	4574	4714	4944	
ΔM (FLM3)	1132	1232	1322	1742	1138	1195	1276	1479	
ΔM (FLM4a)	570	617	666	867	656	678	662	737	
ΔM (FLM4b)	930	1007	1082	1381	1007	1038	1082	1185	
ΔM (FLM4c)	1129	1235	1344	1745	1186	1236	1298	1508	
ΔM (FLM4d)	833	916	984	1312	913	942	1005	1118	
ΔM (FLM4e)	840	950	1162	1420	949	996	1057	1246	

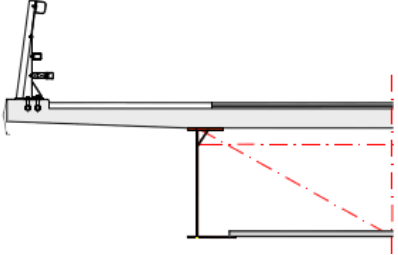
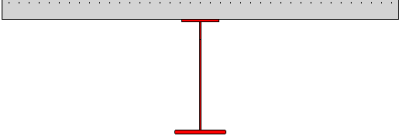
Quadro A.1.37 – Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																										
VÃO PRINCIPAL 30 m																										
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal												
	(·10 ⁶ vp/ano)	18 m			20 m			22,5 m			30 m			18 m			20 m			22,5 m			30 m			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	
FLM3	2	200			217			163			114			122			128			138			183			
FLM4		142	180	200	156	197	217	121	151	166	82	103	114	93	116	128	97	120	133	102	126	140	134	169	187	
FLM3	0,5	174			189			143			100			107			112			120			160			
FLM4		107	143	152	118	157	168	92	120	130	62	82	89	71	93	99	74	97	103	77	102	109	102	135	145	
FLM3	0,125	132			144			108			76			81			85			91			121			
FLM4		82	108	118	89	119	129	69	91	100	47	62	68	56	71	76	58	73	79	59	77	84	77	102	111	
FLM3	0,05	110			120			90			63			68			71			76			101			
FLM4		64	84	93	70	92	102	54	71	79	37	49	54	44	56	61	45	58	63	46	60	67	59	79	88	

Quadro A.1.38 – Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão.

Método Simplificado do EC3-2 – Aplicação estricta																											
VÃO PRINCIPAL 30 m																											
Veículo de fadiga	N _{Obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão Lateral												Vão Principal													
		18 m			20 m			22,5 m			30 m			18 m			20 m			22,5 m			30 m				
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD
FLM3	2	181			191			139			93			99			104			111			149				
FLM4		174	181	181	188	191	191	139	139	139	93	93	93	99	99	99	104	104	104	111	111	111	149	149	149		
FLM3	0,5	181			191			139			93			99			104			111			149				
FLM4		132	170	181	142	183	191	106	137	139	72	92	93	77	99	99	81	104	104	86	110	111	115	148	149		
FLM3	0,125	152			164			122			82			89			93			99			132				
FLM4		100	129	141	108	139	152	81	104	113	55	70	77	59	75	82	62	79	86	66	84	92	87	111	123		
FLM3	0,05	126			136			102			69			74			77			83			110				
FLM4		93	107	117	90	116	126	67	86	95	46	86	64	49	63	69	51	66	72	55	70	77	73	94	102		

Quadro A.1.36 – Resumo das características seccionais da secção de vão lateral e central.

Vão Central 30 m									
½ Secção Real					Secção Estrutural Equivalente				
									

Características Seccionais	Vão Lateral – S1							
	18 m		20 m		22,5 m		30 m	
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]
H _{Total} [cm]	120		120		120		120	
H _{Metal} [cm]	90		90		90		90	
^{1/2} Laje [cm]	590	30	590	30	590	30	590	30
^{1x} Plat. Superior [cm]	55	1,5	55	1,5	55	2	55	3,0
^{1x} Célula Sup [cm]	1,4	28,5	1,4	28,5	1,4	28	1,4	27
^{1x} Alma [cm]	1,2	87	1,2	87	1,2	85,5	1,2	81,5
^{1x} Plat. Inf.[cm]	75	1,5	75	1,5	75	2,5	75	5,5
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	1869394		1869394		2566816		4380584	

Quadro A.1.39 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																										
VÃO PRINCIPAL 30 m																										
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal												
	(·10 ⁶ vp/año)	18 m			20 m			22,5 m			30 m			18 m			20 m			22,5 m			30 m			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	
FLM3	2	200			217			163			114			122			128			138			183			
FLM4		142	180	200	156	197	217	121	151	166	82	103	114	93	116	128	97	120	133	102	126	140	134	169	187	
FLM3	0,5	174			189			143			100			107			112			120			160			
FLM4		107	143	152	118	157	168	92	120	130	62	82	89	71	93	99	74	97	103	77	102	109	102	135	145	
FLM3	0,125	132			144			108			76			81			85			91			121			
FLM4		82	108	118	89	119	129	69	91	100	47	62	68	56	71	76	58	73	79	59	77	84	77	102	111	
FLM3	0,05	110			120			90			63			68			71			76			101			
FLM4		64	84	93	70	92	102	54	71	79	37	49	54	44	56	61	45	58	63	46	60	67	59	79	88	

Quadro A.1.40 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão livre da influência do coeficiente limitativo de dano λ_{MAX}.

Método Simplificado do EC3-2 – Sem λ_{MAX}																									
VÃO PRINCIPAL 30 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral												Vão Principal											
		18 m			20 m			22,5 m			30 m			18 m			20 m			22,5 m			30 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	263			284			212			143			154			162			172			230		
FLM4		174	223	244	187	241	264	140	180	197	94	121	133	101	130	143	106	137	150	114	146	165	152	195	213
FLM3	0,5	200			216			161			108			117			122			130			174		
FLM4		132	169	185	142	183	200	106	136	149	71	92	101	77	92	108	81	104	114	86	111	121	115	148	162
FLM3	0,125	151			163			122			82			88			93			99			132		
FLM4		100	128	140	108	138	151	80	103	113	54	70	76	58	75	82	61	79	86	65	84	92	87	112	123
FLM3	0,05	126			136			102			68			74			77			82			110		
FLM4		83	107	117	90	115	126	67	86	94	45	58	64	49	62	68	51	65	72	54	70	77	73	93	102

Quadro A.1.41 – Comparação entre resultados obtidos através do MDA e Método Simplificado recalibrando o coeficiente λ_{MAX} em função da intensidade de tráfego.

Método Simplificado do EC3-2 – com λ _{MAX} EXPERIMENTAL																			
VÃO PRINCIPAL 30 m																			
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral								Vão Principal									
		18 m		20 m		22,5 m		30 m		18 m		20 m		22,5 m		30 m			
		MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.
FLM3	2	200	238	217	251	163	182	114	122	122	131	128	137	138	147	183	196		
FLM3	0,5	174	180	189	190	143	138	100	92	107	99	112	104	120	111	160	148		
FLM3	0,125	132	137	144	145	108	105	76	70	81	75	85	79	91	84	121	112		
FLM3	0,05	110	114	120	120	90	87	63	58	68	63	71	66	76	70	101	94		

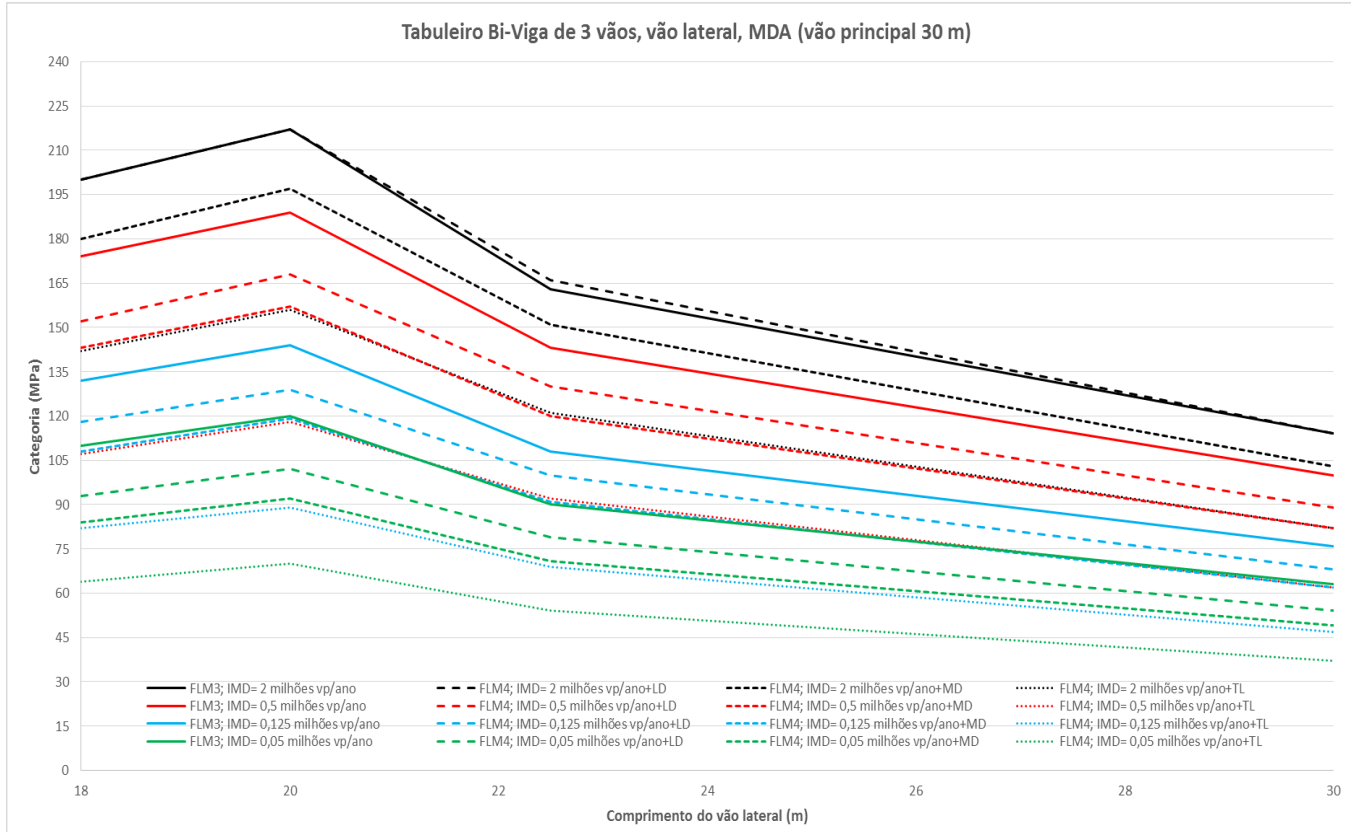


Figura A.1.21 – Evolução da categoria ótima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA.

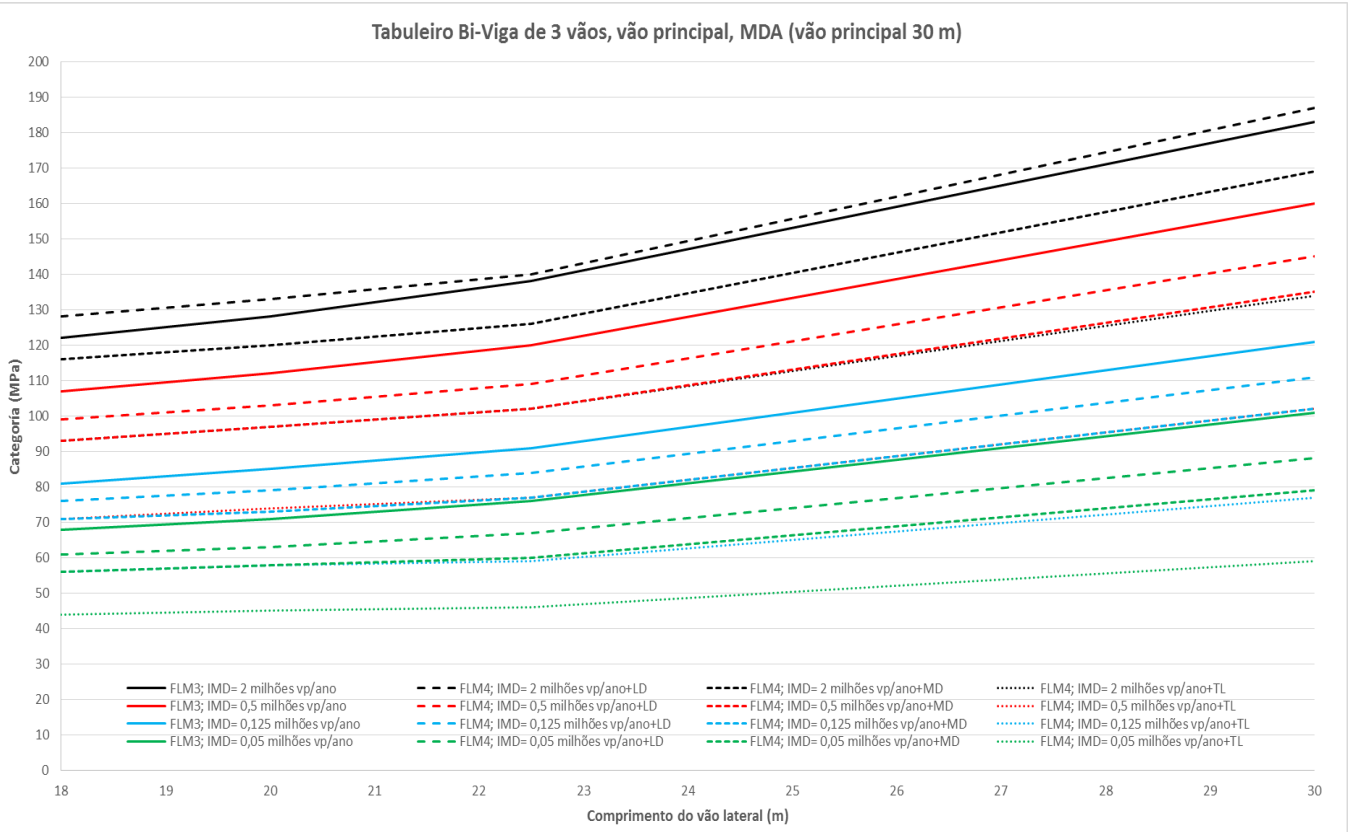


Figura A.1.22 - Evolução da categoria ótima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA

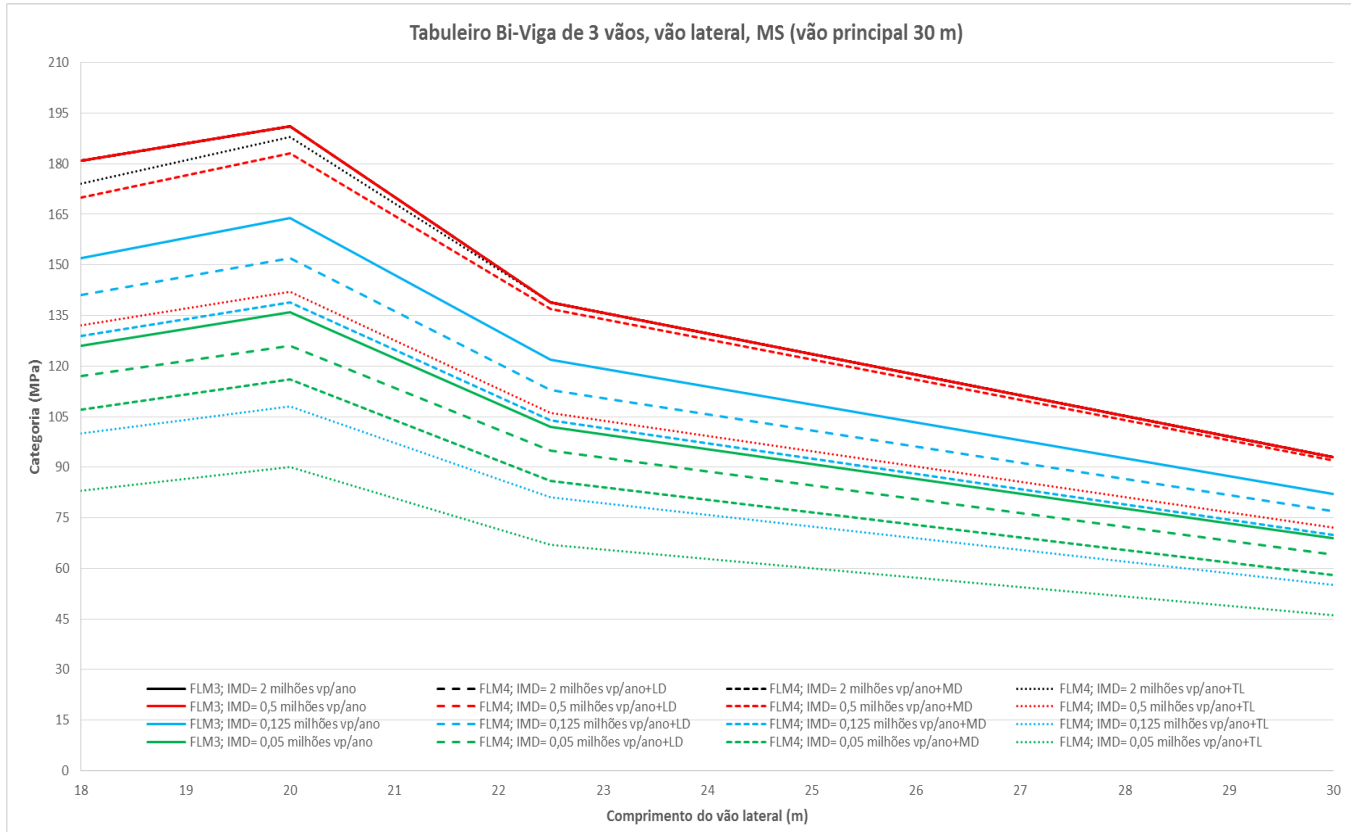


Figura A.1.23 - Evolução da categoria mínima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

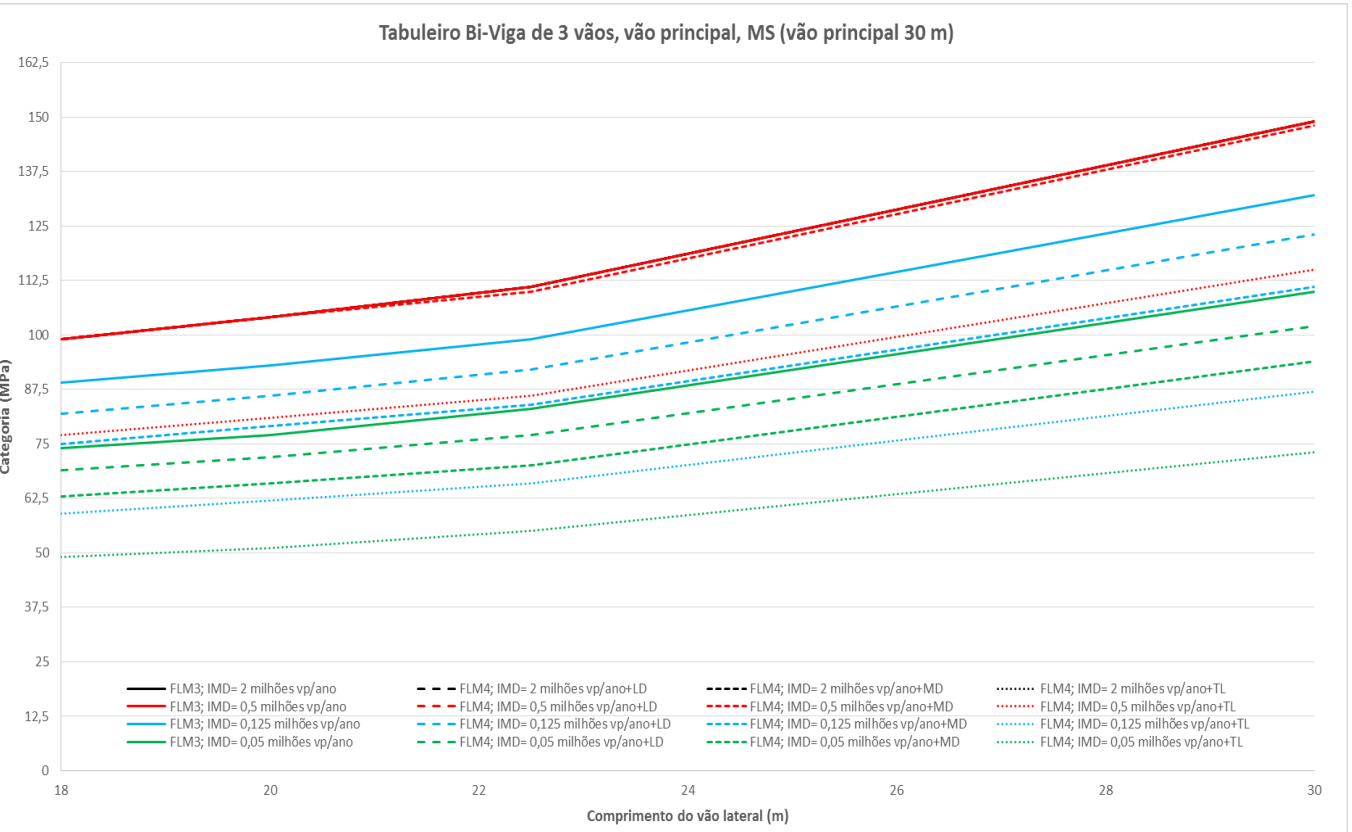
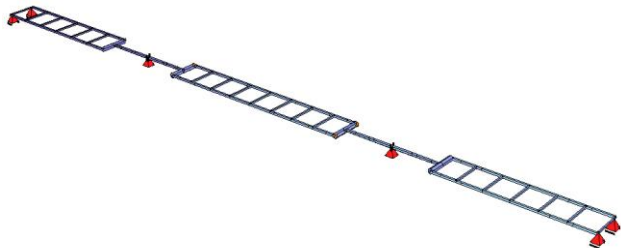
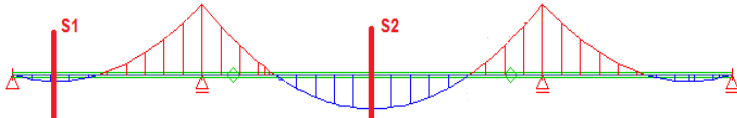
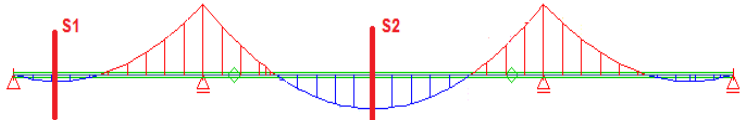
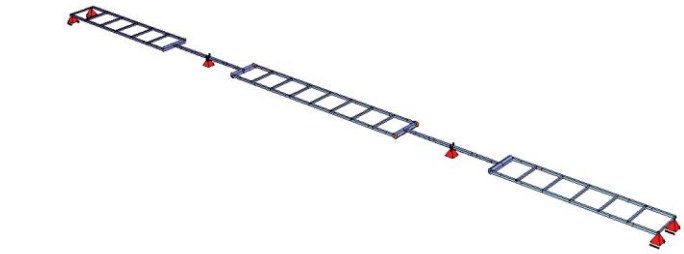


Figura A.1.24 - Evolução da categoria mínima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

Quadro A.1.42 - Resumo de esforços ELU, sobrecarga e oscilação de momentos flectores

Resumo de Esforços - ΔM -kN.m									Modelo Numérico
VÃO PRINCIPAL 45 m									
Caso	Vano Lateral				Vão Principal				
	25 m	30 m	35 m	45 m	25 m	30 m	35 m	45 m	
M _d (ELU)	9136	14108	19383	32284	21044	20404	19154	14765	
M _{max} LM1	5324	6646	7868	11116	7580	7821	8037	8403	
ΔM (FLM3)	1634	1929	2223	2796	1990	2088	2206	2476	
ΔM (FLM4a)	806	954	1100	1341	973	1030	1087	1206	
ΔM (FLM4b)	1297	1503	1704	2089	1553	1645	1738	1929	
ΔM (FLM4c)	1635	1927	2237	2831	2037	2153	2277	2514	
ΔM (FLM4d)	1224	1442	1674	2144	1547	1654	1762	1986	
ΔM (FLM4e)	1328	1594	1881	2428	1730	1853	1977	2217	

Localização das secções analisadas




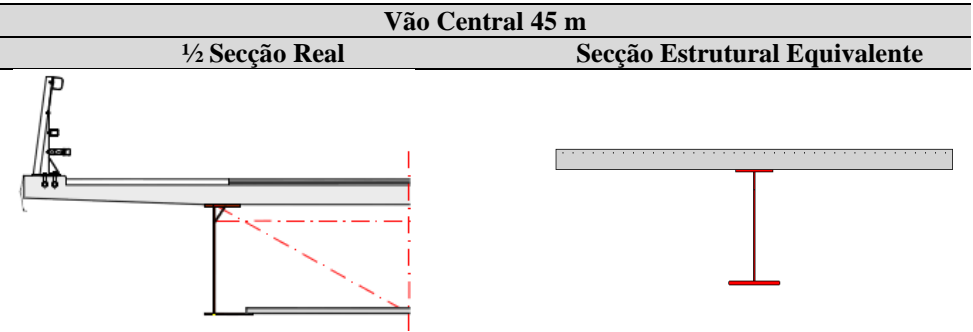
Quadro A.1.44 - Catecoria óptima seundo o MDA. em função das diferentes intensidades de tráfego. configurações dos veículos de Fadiao FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																																	
VÃO PRINCIPAL 45 m																																	
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal																			
	(·10 ⁶ vp/año)	25 m				30 m				35 m				45 m				25 m				30 m				35 m				45 m			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD					
FLM3	2	176				173				133				102				107				125				132				213			
FLM4		127	160	177	125	157	173	97	122	134	75	94	103	79	100	108	94	117	129	100	124	136	459	196	217								
FLM3	0,5	154				152				117				89				94				110				116				186			
FLM4		96	127	137	95	125	135	73	97	104	57	75	80	60	80	85	71	94	100	76	99	106	121	157	170								
FLM3	0,125	117				115				89				68				71				83				88				141			
FLM4		73	96	105	71	95	103	55	73	80	42	56	62	45	60	66	53	71	77	56	75	82	89	119	130								
FLM3	0,05	97				96				74				57				59				69				73				118			
FLM4		56	75	83	56	74	82	43	57	64	33	44	49	34	46	52	41	55	62	44	59	65	69	93	104								

Quadro A.1.45 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão.

Método Simplificado do EC3-2																										
VÃO PRINCIPAL 45 m																										
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão Lateral												Vão Principal												
		25 m			30 m			35 m			45 m			25 m			30 m			35 m			45 m			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	
FLM3	2	143			141			109			83			87			102			108			173			
FLM4		143	143	143	141	141	141	109	109	109	80	83	83	84	87	87	98	102	102	103	108	108	166	173	173	
FLM3	0,5	143			141			109			83			87			102			108			173			
FLM4		113	143	143	109	140	141	82	106	109	60	78	83	64	82	87	74	95	102	78	100	108	126	161	173	
FLM3	0,125	130			125			95			69			73			85			90			144			
FLM4		86	110	121	83	106	116	63	80	88	46	59	64	48	62	68	56	72	79	59	76	83	95	122	134	
FLM3	0,05	108			105			79			58			61			71			75			120			
FLM4		72	92	101	69	89	97	52	67	73	38	49	54	40	52	57	47	60	66	50	64	70	79	102	112	

Quadro A.1.43 - Resumo das características seccionais da secção de vão lateral e central.



Características Seccionais	Vão Lateral – S1							
	25 m		30 m		35 m		45 m	
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]
H _{Total} [cm]	180		180		180		180	
H _{Metal} [cm]	150		150		150		150	
^{1/2} Laje [cm]	590	30	590	30	590	30	590	30
^{1x} Plat. Superior [cm]	55	1,5	55	1,5	55	2,5	55	3,5
^{1x} Célula Sup [cm]	1,4	28,5	1,4	28,5	1,4	27,5	1,4	26,5
^{1x} Alma [cm]	1,2	147	1,2	146,5	1,2	144	1,2	140,5
^{1x} Plat. Inf.[cm]	75	1,5	75	2	75	3,5	80	6
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	4747282		5602174		8013796		12139433	
Y _G [cm]	25,10		26,97		32,28		41,19	
Características Seccionais	Vão Central – S2							
	25 m		30 m		35 m		45 m	
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]
H _{Total} [cm]	180		180		180		180	
H _{Metal} [cm]	150		150		150		150	
^{1/2} Laje [cm]	590	30	590	30	590	30	590	30
^{1x} Plat. Superior [cm]	55	2,5	55	2,5	55	2,5	55	1,5
^{1x} Célula Sup [cm]	1,4	27,5	1,4	27,5	1,4	27,5	1,4	28,5
^{1x} Alma [cm]	1,2	143,5	1,2	144	1,2	144	1,2	146,5
^{1x} Plat. Inf.[cm]	75	4	75	3,5	75	3,5	80	2
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	8769870		8013796		8013796		5832538	
Y _G [cm]	39,93		32,28		32,28		27,47	

Quadro A.1.46 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																									
VÃO PRINCIPAL 45 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal											
	(·10 ⁶ vp/año)	25 m			30 m			35 m			45 m			25 m			30 m			35 m			45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	176			173			133			102			107			125			132			213		
FLM4		127	160	177	125	157	173	97	122	134	75	94	103	79	100	108	94	117	129	100	124	136	459	196	217
FLM3	0,5	154			152			117			89			94			110			116			186		
FLM4		96	127	137	95	125	135	73	97	104	57	75	80	60	80	85	71	94	100	76	99	106	121	157	170
FLM3	0,125	117			115			89			68			71			83			88			141		
FLM4		73	96	105	71	95	103	55	73	80	42	56	62	45	60	66	53	71	77	56	75	82	89	119	130
FLM3	0,05	97			96			74			57			59			69			73			118		
FLM4		56	75	83	56	74	82	43	57	64	33	44	49	34	46	52	41	55	62	44	59	65	69	93	104

Quadro A.1.47 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão livre da influência do coeficiente limitativo de dano λ_{MAX}.

Método Simplificado do EC3-2 – Sem λ_{MAX}																									
VÃO PRINCIPAL 45 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral												Vão Principal											
		25 m			30 m			35 m			45 m			25 m			30 m			35 m			45 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	226			218			164			120			127			148			156			250		
FLM4		149	191	210	144	185	202	108	139	152	79	102	111	84	107	117	97	125	137	103	132	145	465	212	233
FLM3	0,5	171			165			125			91			96			112			118			190		
FLM4		113	145	159	109	140	153	82	106	115	60	77	85	64	82	89	74	95	104	78	100	110	126	161	176
FLM3	0,125	130			125			94			69			73			85			90			144		
FLM4		86	110	120	83	106	116	62	80	88	46	59	64	48	62	68	56	72	79	59	76	83	95	122	134
FLM3	0,05	108			104			79			58			61			71			75			120		
FLM4		71	92	100	69	88	97	52	67	73	38	49	54	40	51	56	47	60	66	49	63	69	79	102	111

Quadro A.1.48 - Comparação entre resultados obtidos através do MDA e Método Simplificado recalibrando o coeficiente λ_{MAX} em função da intensidade de tráfego.

Método Simplificado do EC3-2 – com λ_{MAX} EXPERIMENTAL																	
VÃO PRINCIPAL 45 m																	
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral								Vão Principal							
	(·10 ⁶ vp/año)	25 m		30 m		35 m		45 m		25 m		30 m		35 m		45 m	
		MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.
FLM3	2	176	188	173	185	133	146	102	109	107	115	125	134	132	142	213	228
FLM3	0,5	154	143	152	140	117	108	89	83	94	87	110	102	116	107	186	173
FLM3	0,125	117	108	115	106	89	82	68	63	71	66	83	77	88	81	141	131
FLM3	0,05	97	90	96	89	74	68	57	52	59	55	69	64	73	68	118	109

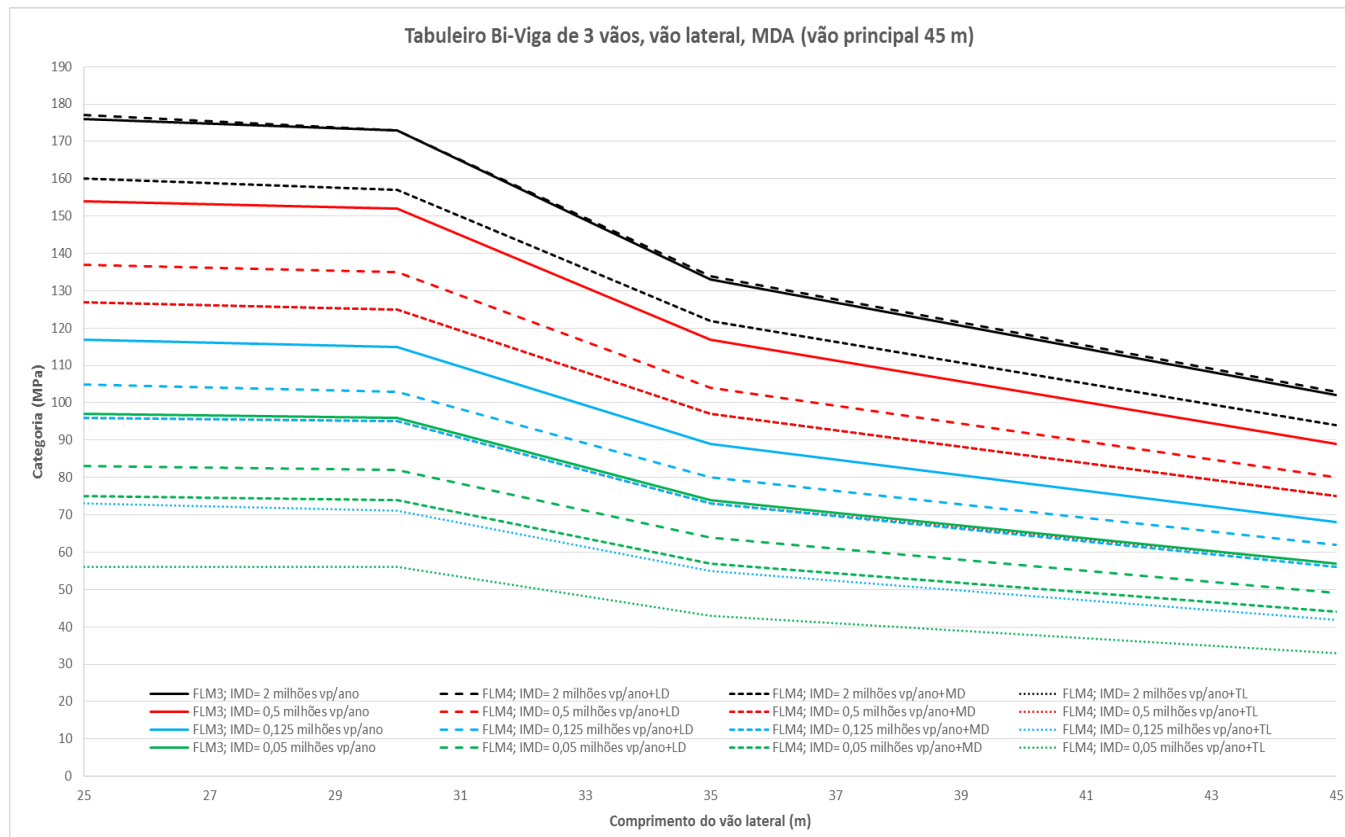


Figura A.1.25 - Evolução da categoria ótima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA.

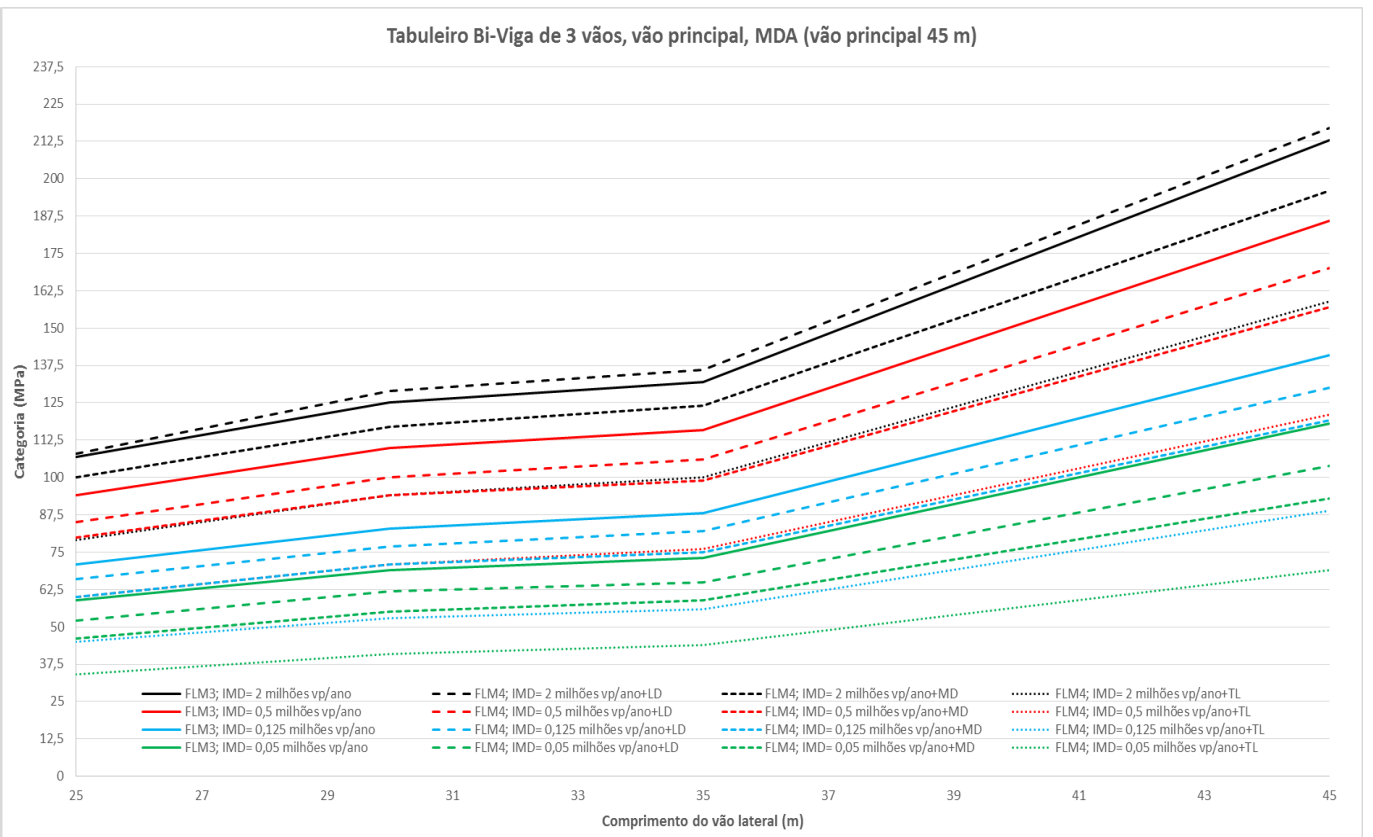


Figura A.1.26 - Evolução da categoria ótima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA.

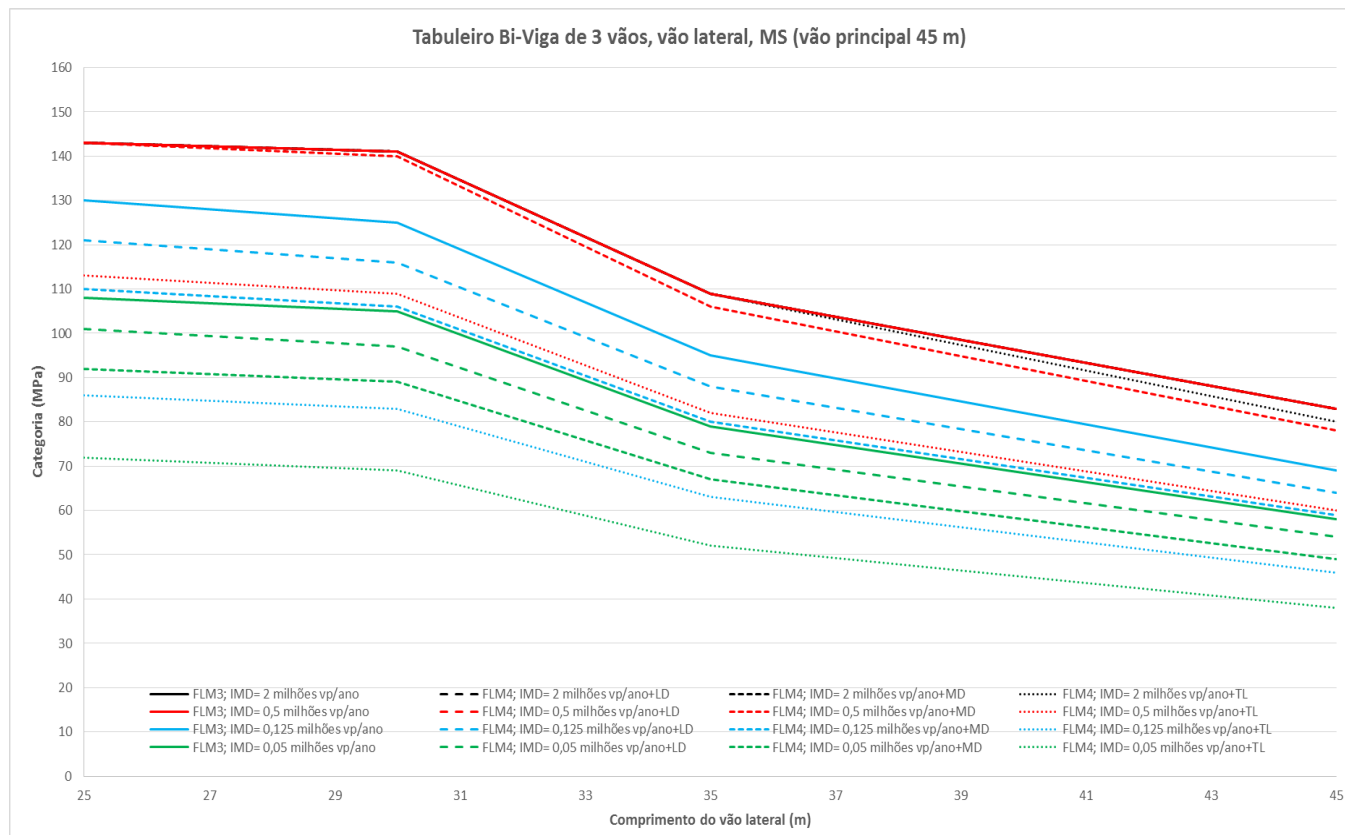


Figura A.1.27 - Evolução da categoria ótima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

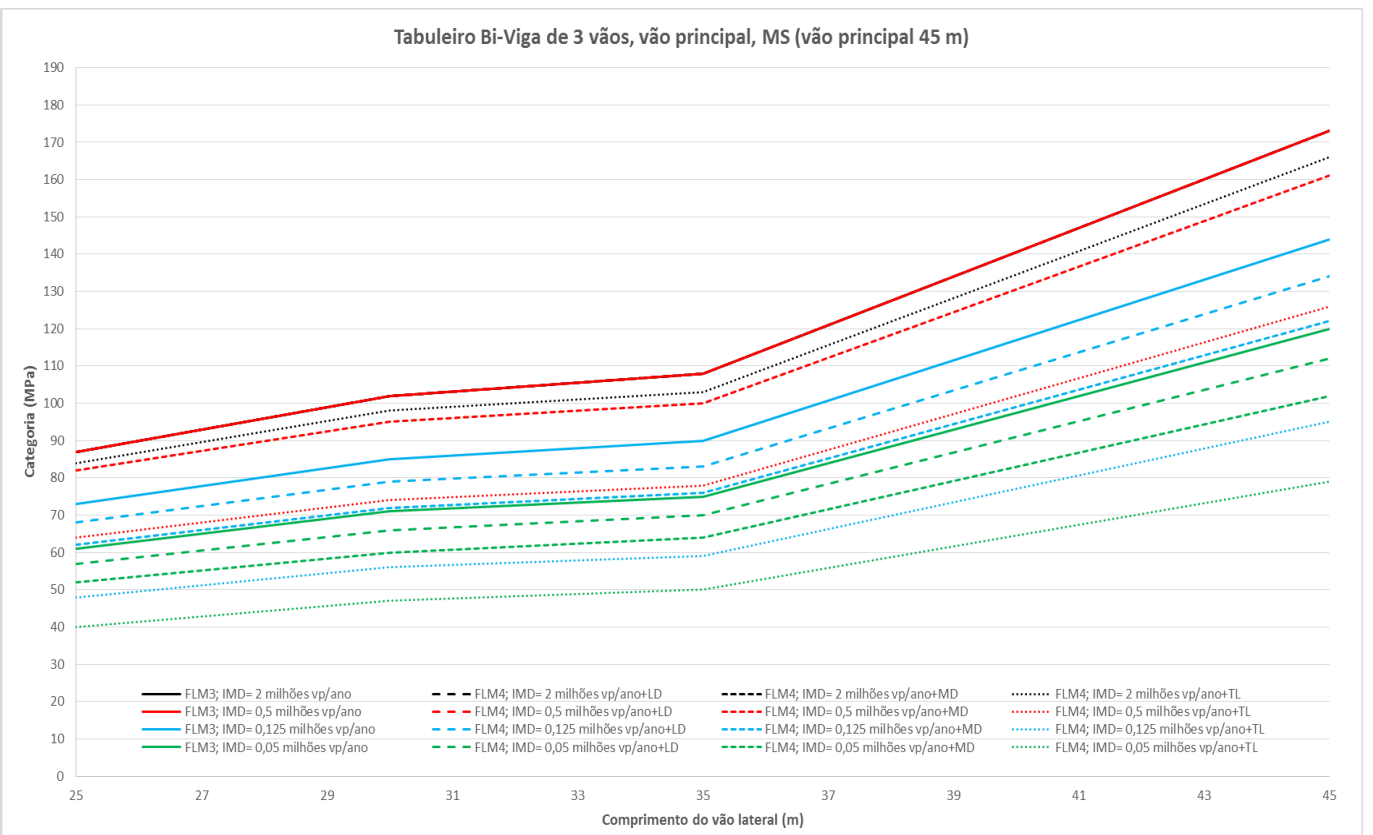
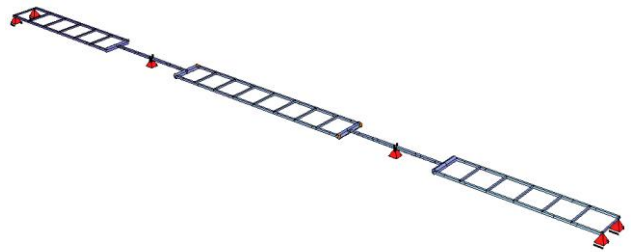
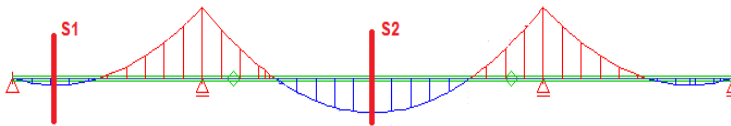


Figura A.1.28 - Evolução da categoria ótima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

Quadro A.1.49 - Resumo de esforços ELU, sobrecarga e oscilação de momentos flectores

Resumo de Esforços - ΔM -kN.m									Modelo Numérico
VÃO PRINCIPAL 60 m									
Caso	Vano Lateral				Vão Principal				
	36 m	40 m	45 m	60 m	36 m	40 m	45 m	60 m	
M _d (ELU)	16762	21752	28705	53525	33027	32973	30333	21144	
M _{max} LM1	8587	9675	11130	16710	11438	11651	11932	12615	
ΔM (FLM3)	2479	2835	2975	3735	2885	3083	3120	3522	
ΔM (FLM4a)	1168	1314	1351	1677	1380	1665	1483	1662	
ΔM (FLM4b)	1812	2074	2104	2703	2198	2324	2348	2596	
ΔM (FLM4c)	2479	2895	2997	3792	2931	3127	3174	3594	
ΔM (FLM4d)	1885	2262	2299	2936	2312	2469	2507	2841	
ΔM (FLM4e)	2073	2495	2552	3293	2595	2765	2800	3155	

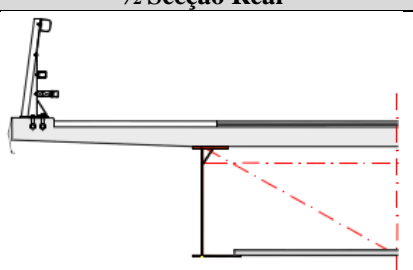
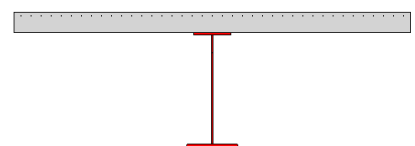
Quadro A.1.51 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																																	
VÃO PRINCIPAL 60 m																																	
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal																			
	(·10 ⁶ vp/año)	36 m				40 m				45 m				60 m				36 m				40 m				45 m				60 m			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD					
FLM3	2	193				150				128				83				107				114				124				204			
FLM4		139	176	192	110	138	152	92	118	130	60	76	85	79	98	108	84	104	115	93	115	126	151	188	208								
FLM3	0,5	170				131				113				73				93				99				109				178			
FLM4		105	140	150	84	110	120	71	93	101	46	60	66	60	78	85	64	84	91	70	92	99	115	151	164								
FLM3	0,125	129				99				86				55				70				75				82				135			
FLM4		78	106	116	61	84	92	52	71	78	34	46	51	44	60	65	49	63	69	52	70	76	84	114	125								
FLM3	0,05	107				83				71				46				59				63				69				112			
FLM4		61	82	92	47	65	73	40	55	62	26	36	40	34	46	52	39	50	55	40	54	60	65	88	99								

Quadro A.1.52 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão

Método Simplificado do EC3-2																										
VÃO PRINCIPAL 60 m																										
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal												
	(·10 ⁶ vp/ano)	36 m			40 m			45 m			60 m			36 m			40 m			45 m			60 m			
	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD		
FLM3	2	158			121			105			67			86			92			101			165			
FLM4		157	158	158	119	121	121	100	105	105	60	67	67	77	86	86	82	92	92	90	101	101	147	165	165	
FLM3	0,5	158			121			105			67			86			92			101			165			
FLM4		119	153	158	90	116	121	76	98	105	55	58	64	58	75	82	63	80	88	68	88	96	111	143	157	
FLM3	0,125	137			104			87			52			67			71			78			128			
FLM4		90	116	127	68	88	96	58	74	81	34	44	48	44	57	62	47	61	67	52	67	73	85	109	119	
FLM3	0,05	114			86			73			44			56			60			65			107			
FLM4		75	97	106	57	73	73	48	62	68	29	37	40	37	48	52	40	50	55	43	55	61	70	90	99	

Quadro A.1.50 - Resumo das características seccionais da secção de vão lateral e central.

Vão Central 60 m									
½ Secção Real					Secção Estrutural Equivalente				
									

Características Seccionais	Vão Lateral – S1							
	36 m		40 m		45 m		60 m	
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]
H _{Total} [cm]	200		200		200		250	
H _{Metal} [cm]	170		170		170		220	
¹ / ₂ Laje [cm]	590	30	590	30	590	30	590	30
¹ ×Plat. Superior [cm]	55	1,5	55	2,5	55	2,5	55	3,5
¹ ×Célula Sup [cm]	1,4	28,5	1,4	27,5	1,4	27,5	1,4	26,5
¹ ×Alma [cm]	1,2	166,5	1,2	164	1,2	163	1,2	211
¹ ×Plat. Inf.[cm]	75	2	75	3,5	75	4,5	100	5,5
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	7181976		10198110		12066427		40319390	

Y _G [cm]	29,23	35,07	38,69
---------------------	-------	-------	-------

Quadro A.1.53 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																									
VÃO PRINCIPAL 60 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral												Vão Principal											
		36 m			40 m			45 m			60 m			36 m			40 m			45 m			60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	193			150			128			83			107			114			124			204		
FLM4		139	176	192	110	138	152	92	118	130	60	76	85	79	98	108	84	104	115	93	115	126	151	188	208
FLM3	0,5	170			131			113			73			93			99			109			178		
FLM4		105	140	150	84	110	120	71	93	101	46	60	66	60	78	85	64	84	91	70	92	99	115	151	164
FLM3	0,125	129			99			86			55			70			75			82			135		
FLM4		78	106	116	61	84	92	52	71	78	34	46	51	44	60	65	49	63	69	52	70	76	84	114	125
FLM3	0,05	107			83			71			46			59			63			69			112		
FLM4		61	82	92	47	65	73	40	55	62	26	36	40	34	46	52	39	50	55	40	54	60	65	88	99

Quadro A.1.54 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão livre da influência do coeficiente limitativo de dano λ_{MAX}.

Método Simplificado do EC3-2 – Sem λ _{MAX}																									
VÃO PRINCIPAL 60 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral												Vão Principal											
		36 m			40 m			45 m			60 m			36 m			40 m			45 m			60 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	238			180			152			91			116			124			136			223		
FLM4		157	202	221	119	153	167	100	129	141	60	77	84	77	99	108	82	106	115	90	116	126	147	189	207
FLM3	0,5	181			127			115			69			88			94			103			169		
FLM4		119	153	167	90	116	127	76	97	107	45	58	64	58	75	82	62	80	87	68	87	96	112	143	157
FLM3	0,125	137			104			87			52			67			72			78			128		
FLM4		90	116	127	68	88	96	58	74	81	35	44	49	44	57	62	47	61	66	52	66	73	85	112	119
FLM3	0,05	114			86			73			44			56			60			65			107		
FLM4		75	96	106	57	73	80	48	62	68	29	37	40	37	47	52	39	50	55	43	55	60	70	90	99

Quadro A.1.55 - Comparação entre resultados obtidos através do MDA e Método Simplificado recalibrando o coeficiente λ_{MAX} em função da intensidade de tráfego.

Método Simplificado do EC3-2 – com λ _{MAX} EXPERIMENTAL																			
VÃO PRINCIPAL 60 m																			
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral								Vão Principal									
		36 m		40 m		45 m		60 m		36 m		40 m		45 m		60 m			
		MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.
FLM3	2	193	208	150	160	128	138	83	88	107	113	114	121	124	133	204	218		
FLM3	0,5	170	157	131	121	113	104	73	67	93	86	99	92	109	101	178	165		
FLM3	0,125	129	119	99	92	86	79	55	51	70	65	75	70	82	76	135	125		
FLM3	0,05	107	99	83	77	71	66	46	42	59	54	63	58	69	64	112	104		

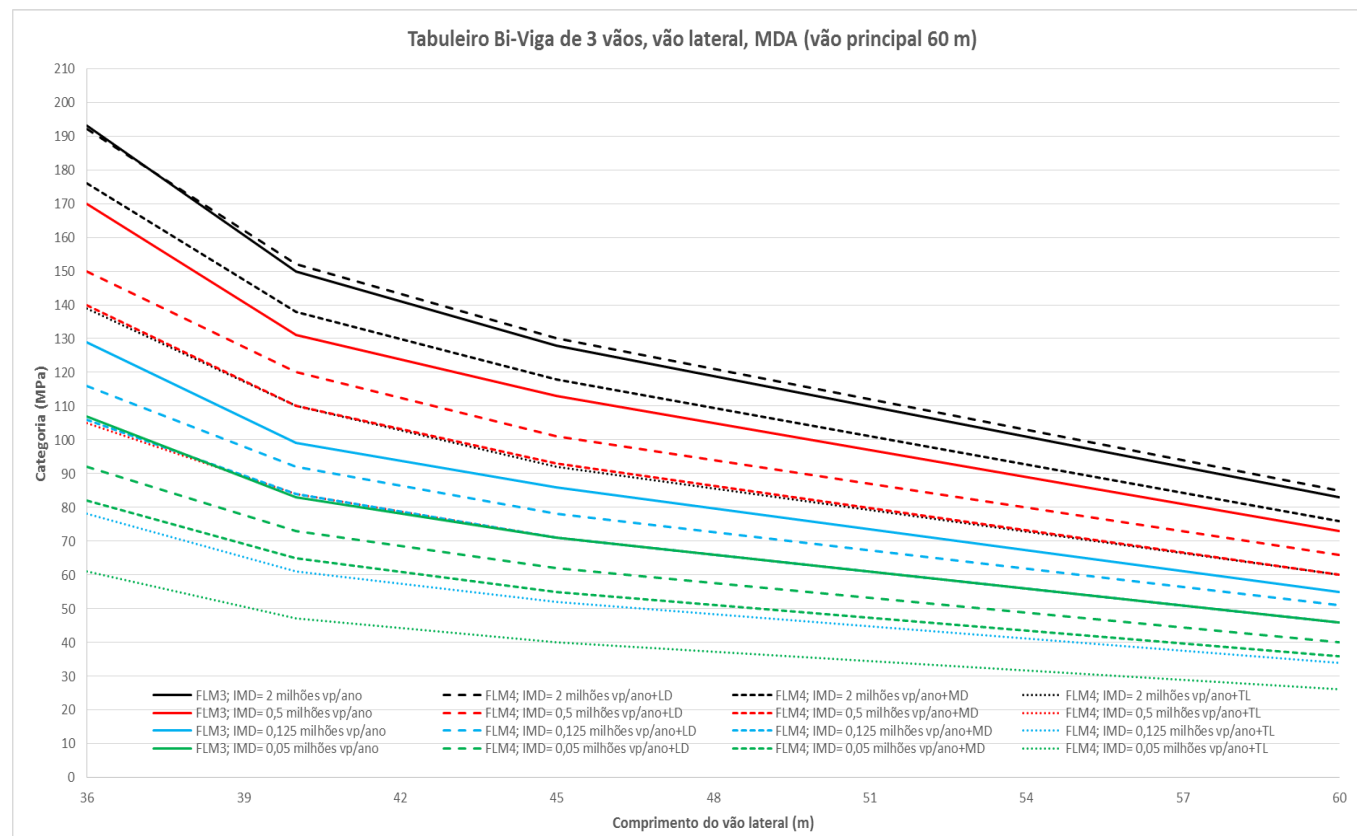


Figura A.1.29 - Evolução da categoria óptima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA.

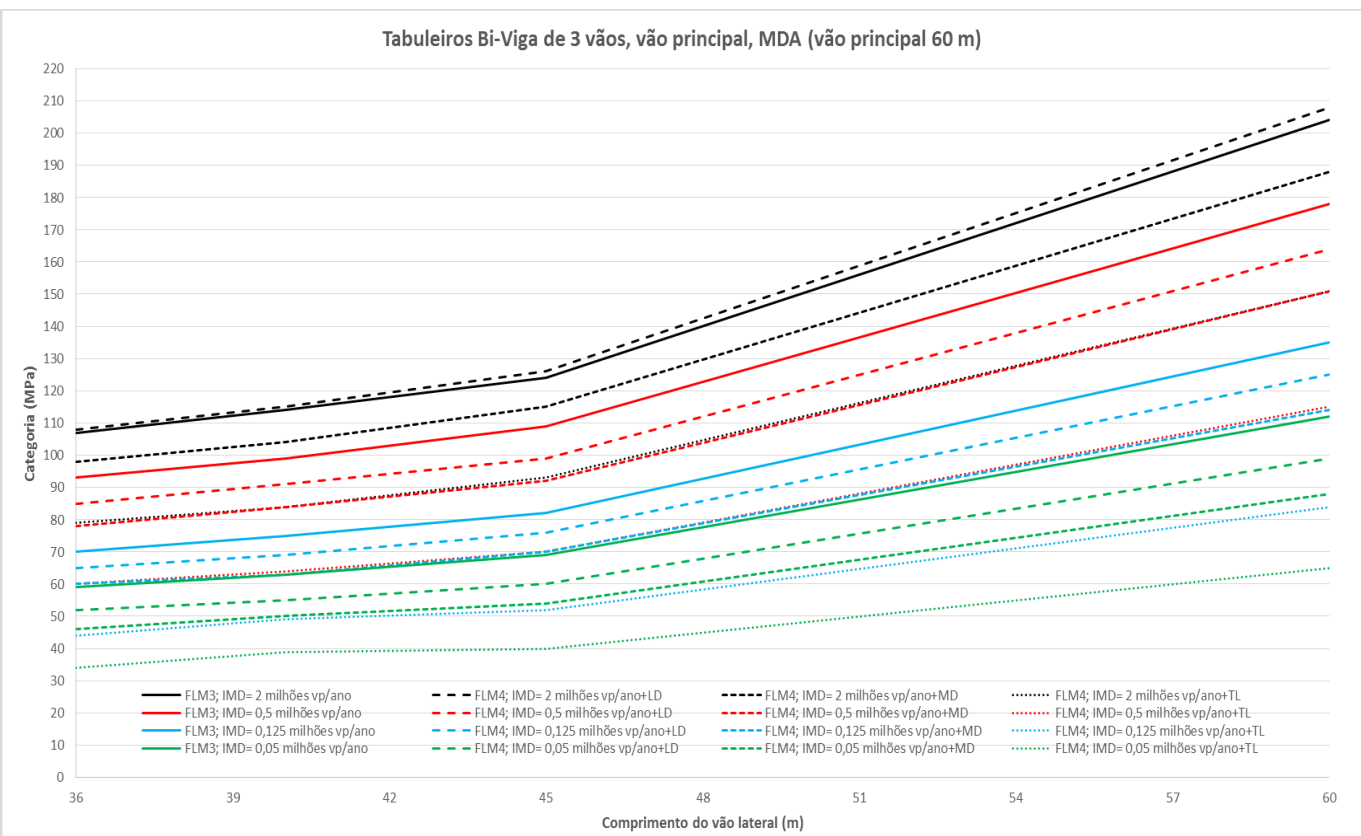


Figura A.1.30 - Evolução da categoria óptima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA.

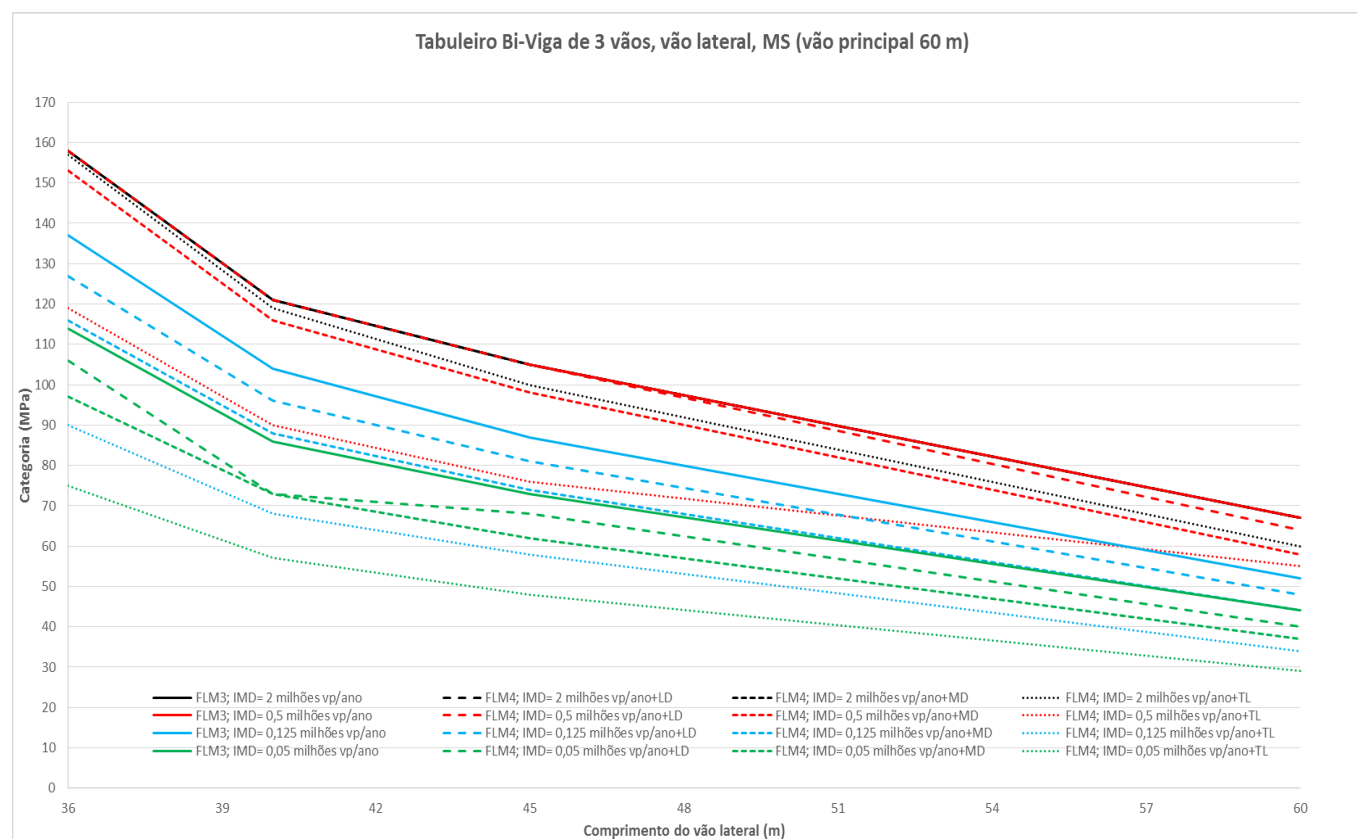


Figura A.1.31 - Evolução da categoria óptima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S..

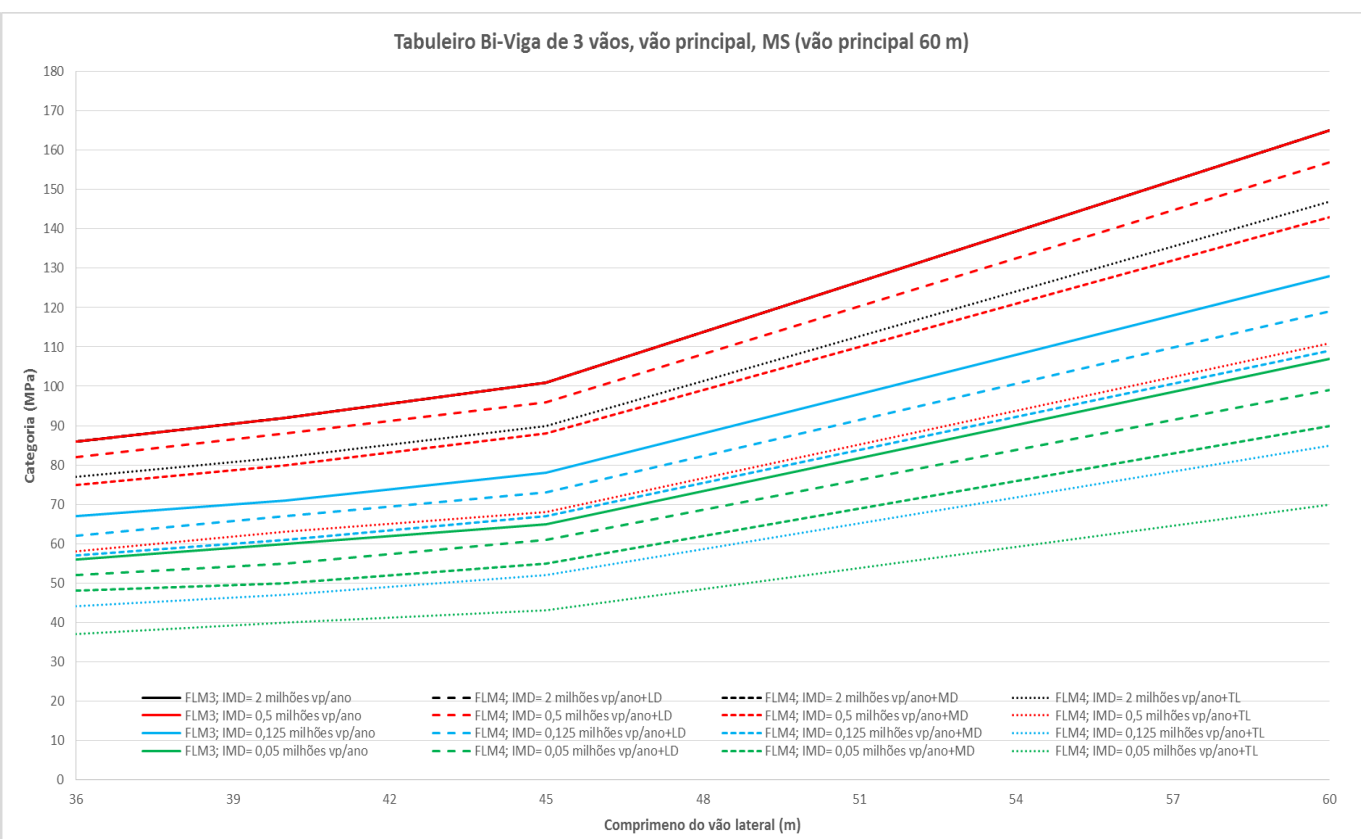
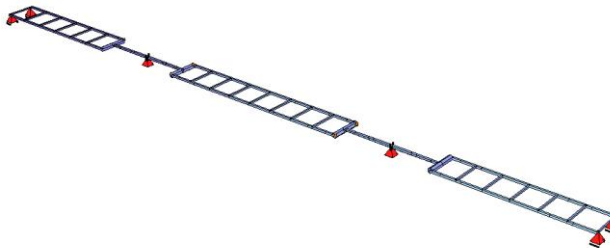
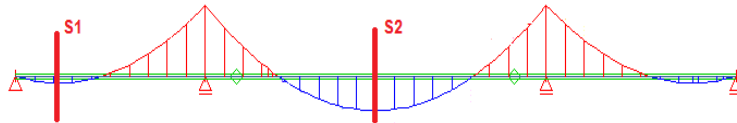


Figura A.1.32 - Evolução da categoria óptima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S..

Quadro A.1.56 - Resumo de esforços ELU, sobrecarga e oscilação de momentos flectores

Resumo de Esforços - ΔM -kN.m									Modelo Numérico
VÃO PRINCIPAL 75 m									
Caso	Vano Lateral				Vão Principal				
	45 m	50 m	60 m	75 m	45 m	50 m	60 m	75 m	
M _d (ELU)	23543	31497	48289	79274	47874	46372	41419	29130	
M _{max} LM1	11688	13399	16527	23144	15744	16080	16692	17480	
ΔM (FLM3)	3280	3549	4114	4859	3736	3865	4129	4535	
ΔM (FLM4a)	1563	1682	1860	2102	1747	1804	1920	2087	
ΔM (FLM4b)	2440	2638	2876	3326	2742	2821	2982	3233	
ΔM (FLM4c)	3394	3689	4213	4906	3806	3939	4250	4635	Localização das secções analisadas
ΔM (FLM4d)	2605	2822	3268	3829	3008	3114	3334	3634	
ΔM (FLM4e)	2920	3197	3723	4373	3360	3473	3705	4062	

	
---	--

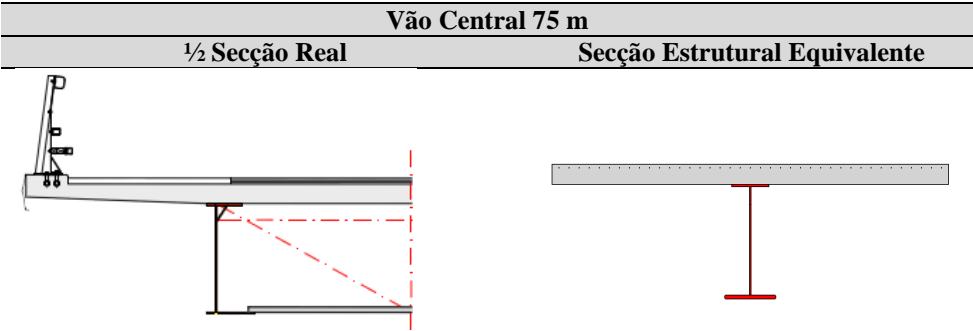
Quadro A.1.58 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																									
VÃO PRINCIPAL 75 m																									
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal											
	(·10 ⁶ vp/ano)	45			50			60			75			45			50			60			75		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	163			132			103			72			97			101			115			184		
FLM4		121	152	168	98	124	137	75	95	104	52	66	73	72	90	99	74	93	103	84	107	118	133	169	188
FLM3	0,5	142			115			89			63			85			88			100			160		
FLM4		92	121	130	75	98	106	58	75	82	40	52	57	55	72	78	57	74	81	65	85	93	103	134	147
FLM3	0,125	108			87			68			48			64			67			76			121		
FLM4		68	92	100	55	75	82	41	57	63	29	40	44	40	54	59	42	56	62	47	65	71	75	102	112
FLM3	0,05	90			73			57			40			54			56			63			101		
FLM4		52	71	80	42	58	65	31	44	50	22	31	35	31	42	47	32	44	49	37	50	56	58	79	89

Quadro A.1.59 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão

Método Simplificado do EC3-2																									
VÃO PRINCIPAL 75 m																									
Veículo de fadiga	N _{Obs} (·10 ⁶ vp/ano)	Vão Lateral												Vão Principal											
		45 m			50 m			60 m			75 m			45 m			50 m			60 m			75 m		
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD
FLM3	2	131			107			83			58			78			81			93			148		
FLM4		126	131	131	100	107	107	74	83	83	52	58	58	65	78	78	67	81	81	77	93	93	133	148	148
FLM3	0,5	131			107			83			58			75			77			88			148		
FLM4		95	122	131	76	97	107	56	72	79	39	51	55	49	63	69	51	65	72	58	75	82	100	129	141
FLM3	0,125	110			87			65			45			56			59			67			115		
FLM4		72	93	102	58	74	81	43	55	60	30	38	42	37	48	53	39	50	55	44	57	62	76	98	107
FLM3	0,05	91			73			54			38			47			49			56			96		
FLM4		60	77	85	48	62	67	36	46	50	25	32	35	31	40	44	32	42	45	37	47	52	64	82	89

Quadro A.1.57 - Resumo das características seccionais da secção de vão lateral e central.



Características Seccionais	Vão Lateral – S1							
	45 m		50 m		60 m		75 m	
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]
H _{Total} [cm]	245		245		245		285	
H _{Metal} [cm]	215		215		215		255	
^{1/2} Laje [cm]	590	30	590	30	590	30	590	30
^{1x} Plat. Superior [cm]	55	1,5	55	2,5	55	2,5	55	3,5
^{1x} Célula Sup [cm]	1,4	28,5	1,4	27,5	1,4	27,5	1,4	26,5
^{1x} Alma [cm]	1,2	211,5	1,2	209,5	1,2	208	1,5	245,5
^{1x} Plat. Inf.[cm]	100	2	100	3	110	4,5	120	6
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	13823017		17834548		24954935		45786860	
Y _G [cm]	38,06		44,09		55,01		77,18	
Características Seccionais	Vão Central – S2							
	45 m		50 m		60 m		75 m	
	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]	B[m]	H[m]
H _{Total} [cm]	245		245		245		285	
H _{Metal} [cm]	215		215		215		255	
^{1/2} Laje [cm]	590	30	590	30	590	30	590	30
^{1x} Plat. Superior [cm]	55	3,0	55	3,0	55	3,0	55	2,5
^{1x} Célula Sup [cm]	1,4	27	1,4	27	1,4	27	1,4	27,5
^{1x} Alma [cm]	1,5	207,5	1,5	207,5	1,5	213	1,2	250,5
^{1x} Plat. Inf.[cm]	100	4,5	500	4,5	100	4,5	100	2
I _{Secção Mista} [cm ⁴]	24016631		24016631		23323570		19769944	
Y _G [cm]	53,89		53,89		52,24		43,75	

Quadro A.1.60 - Categoria óptima segundo o MDA, em função das diferentes intensidades de tráfego, configurações dos veículos de Fadiga FLM3 e 4.

Método do Dano Acumulado																										
VÃO PRINCIPAL 75 m																										
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal												
	(·10 ⁶ vp/año)	45			50			60			75			45			50			60			75			
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	
FLM3	2	163			132			103			72			97			101			115			184			
FLM4		121	152	168	98	124	137	75	95	104	52	66	73	72	90	99	74	93	103	84	107	118	133	169	188	
FLM3	0,5	142			115			89			63			85			88			100			160			
FLM4		92	121	130	75	98	106	58	75	82	40	52	57	55	72	78	57	74	81	65	85	93	103	134	147	
FLM3	0,125	108			87			68			48			64			67			76			121			
FLM4		68	92	100	55	75	82	41	57	63	29	40	44	40	54	59	42	56	62	47	65	71	75	102	112	
FLM3	0,05	90			73			57			40			54			56			63			101			
FLM4		52	71	80	42	58	65	31	44	50	22	31	35	31	42	47	32	44	49	37	50	56	58	79	89	

Quadro A.1.62 - Categoria mínima segundo o Método Simplificado do EC3-2 em função das diferentes intensidades de tráfego e distribuição dos comprimentos de vão livre da influência do coeficiente limitativo de dano λ_{MAX}.

Método Simplificado do EC3-2 – Sem λ_{MAX}																															
VÃO PRINCIPAL 75 m																															
Veículo de fadiga	N _{obs}	Vão Lateral												Vão Principal																	
	(·10 ⁶ vp/año)	45			50			60			75			45			50			60			75								
		TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD	TL	MD	LD						
FLM3	2		191				151				112				78				98				102				116				201
FLM4		126	162	177	100	128	140	74	95	104	52	66	73	65	83	92	67	86	94	77	99	108	132	170	186						
FLM3	0,5		145				114				85				60				75				77				88				152
FLM4		96	123	134	76	97	106	56	72	79	39	50	55	49	63	69	51	65	72	58	75	82	100	129	141						
FLM3	0,125		110				87				64				45				56				59				67				115
FLM4		72	93	102	57	74	81	43	55	60	30	38	42	37	48	52	39	50	55	44	57	62	76	98	107						
FLM3	0,05		91				72				54				38				47				49				56				96
FLM4		60	78	85	48	62	67	35	45	50	25	32	35	31	40	44	32	41	45	37	47	52	63	81	89						

Quadro A.1.63 - Comparação entre resultados obtidos através do MDA e Método Simplificado recalibrando o coeficiente λ_{MAX} em função da intensidade de tráfego.

Método Simplificado do EC3-2 – com λ _{MAX} EXPERIMENTAL																			
VÃO PRINCIPAL 75 m																			
Veículo de fadiga	N _{obs} (·10 ⁶ vp/año)	Vão Lateral								Vão Principal									
		45 m		50 m		60 m		75 m		45 m		50 m		60 m		75 m			
		MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.	MDA	M.S.
FLM3	2	163	173	132	140	103	109	72	76	97	104	101	107	115	122	184	196		
FLM3	0,5	142	131	115	106	89	83	63	58	85	79	88	81	100	93	160	148		
FLM3	0,125	108	100	87	81	68	63	48	44	64	60	67	62	76	70	121	112		
FLM3	0,05	90	83	73	67	57	52	40	37	54	50	56	51	63	59	101	94		

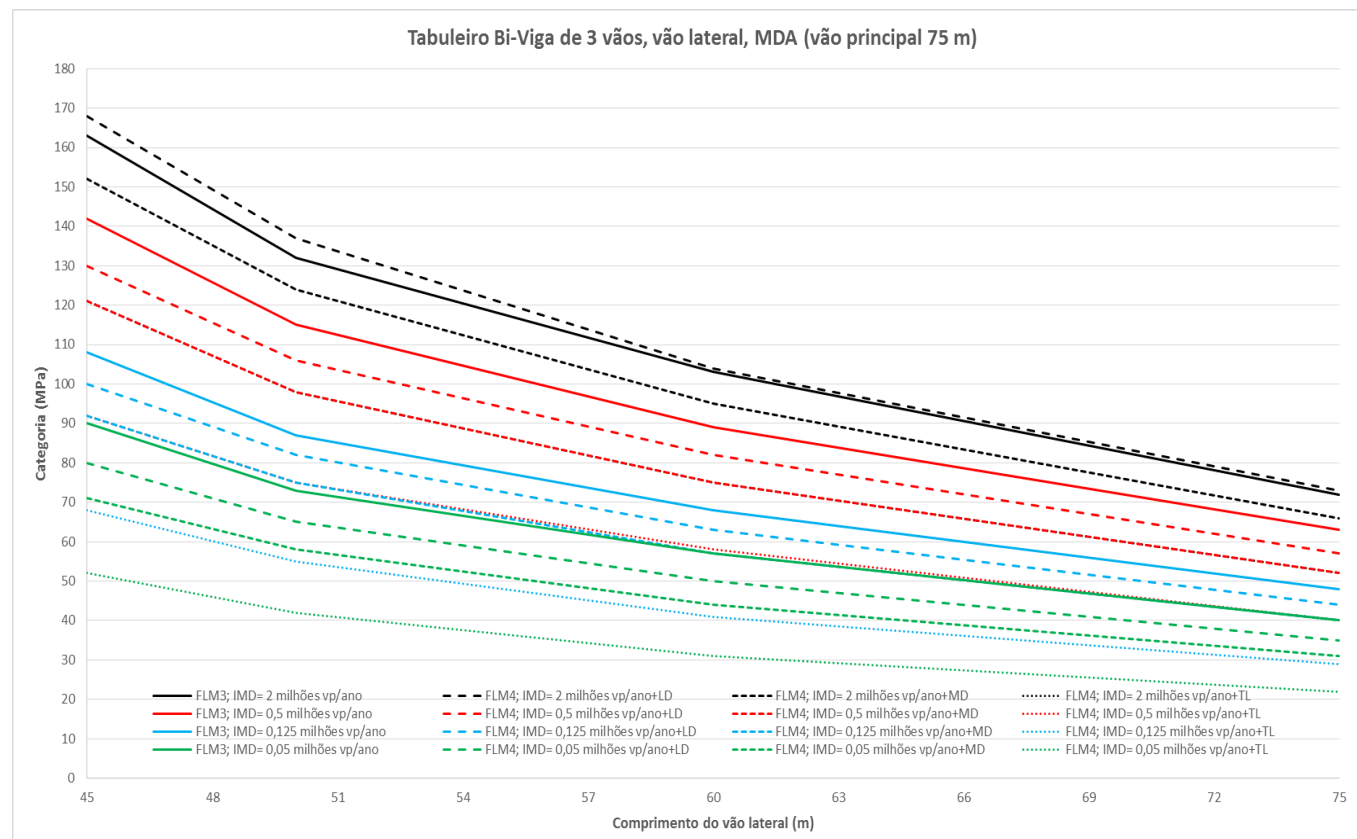


Figura A.1.33 - Evolução da categoria óptima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA.

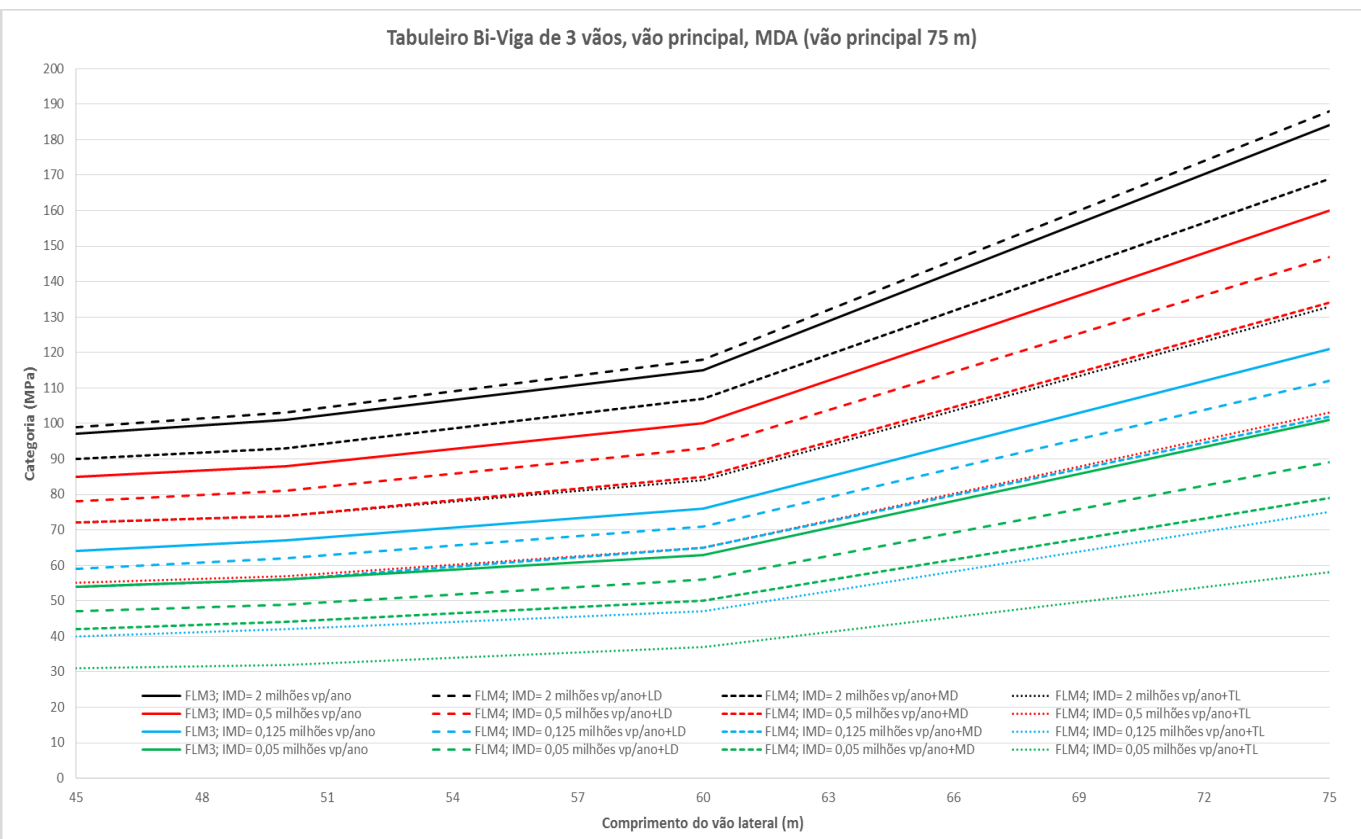


Figura A.1.34 - Evolução da categoria óptima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o MDA.

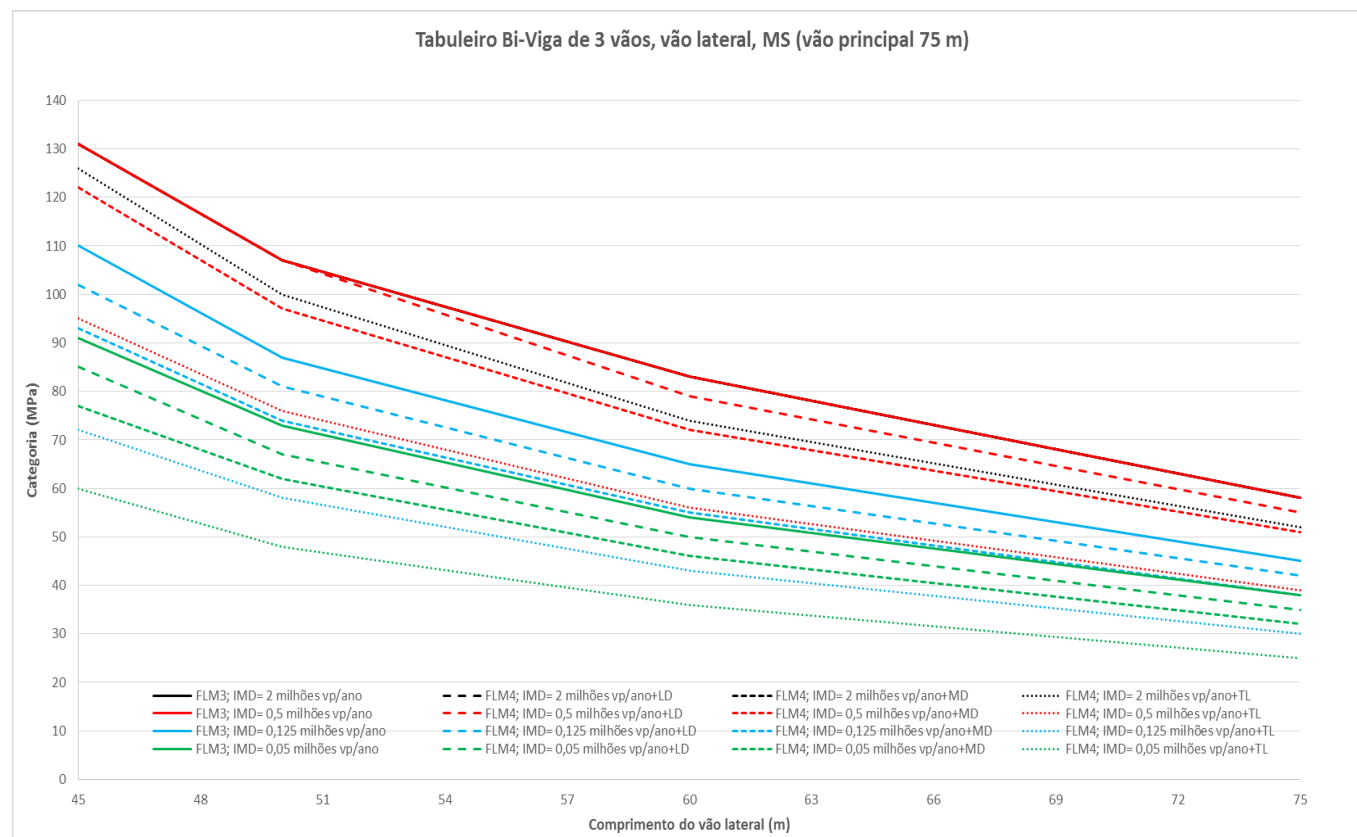


Figura A.1.35 - Evolução da categoria óptima do vão lateral em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S.

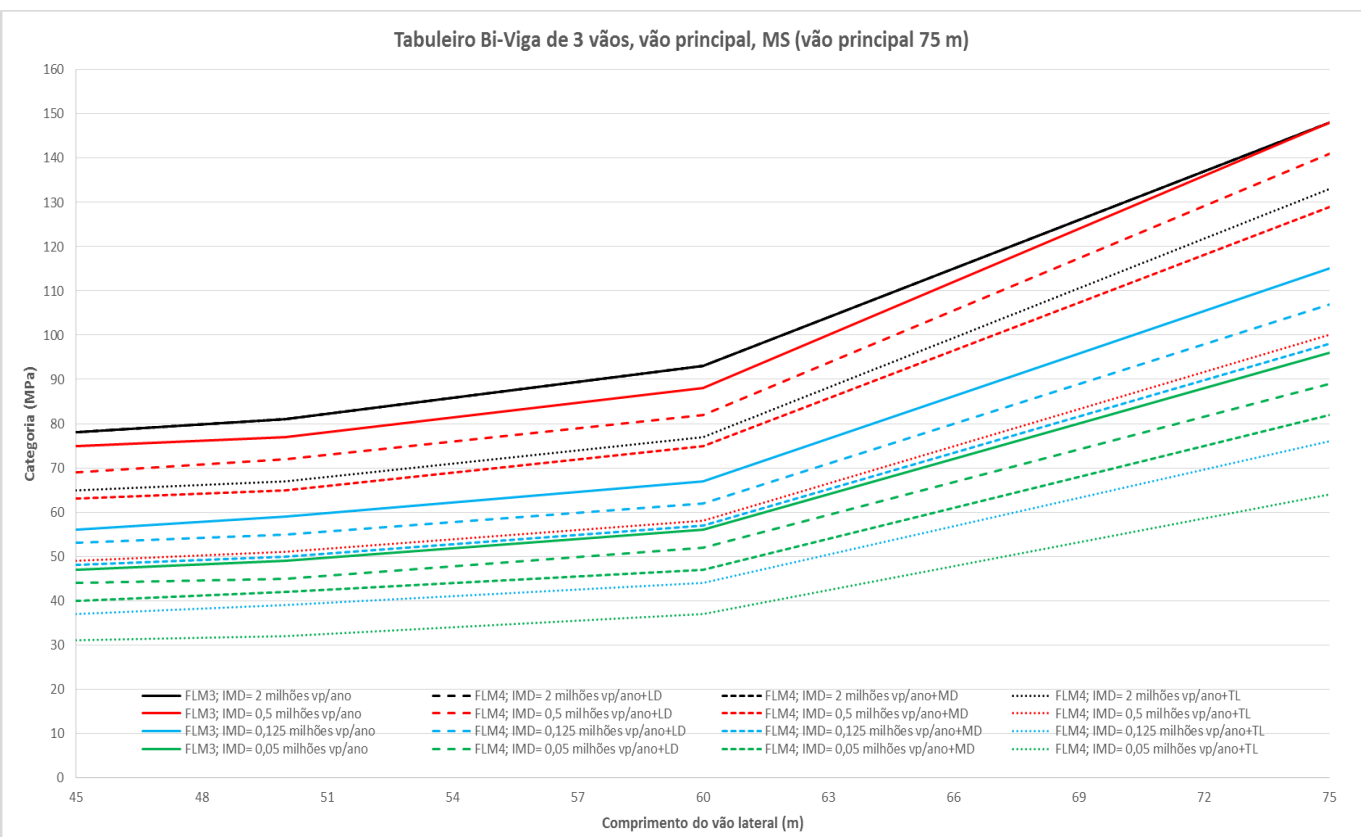


Figura A.1.36 - Evolução da categoria óptima do vão central em função do comprimento de vão, intensidades de tráfego de acordo com o M.S..

ANEXO B – TABELAS DE CLASSIFICAÇÃO DE PORMENORES DA EN1993-1-9

Tabela B.1 – Elementos não soldados e elementos com ligações mecânicas Adaptado de EN1993-1-9 (2010))





Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
160	<p>NOTA: A curva de resistência à fadiga associada à categoria 160 é a mais elevada. Nenhum pormenor pode atingir uma melhor resistência à fadiga seja qual for o número de ciclos.</p> 	<p><u>Produtos laminados ou extrudidos:</u></p> <p>1) Chapas e barras com bordos laminados. 2) Perfis laminados com bordos laminados. 3) Seções tubulares sem costura, rectangulares ou circulares.</p>	<p><u>Pormenores 1) a 3):</u></p> <p>Arestas vivas, imperfeições superficiais e de laminagem melhoradas por rectificação até à sua eliminação e obtenção de uma transição suave.</p>
140		<p><u>Chapas cortadas mecanicamente ou por processo autogéneo:</u></p> <p>4) Corte autogéneo ou mecânico com rectificação posterior.</p>	<p>4) Eliminação de todos os sinais visíveis de defeitos nos bordos. Zonas de corte são maquinadas ou rectificadas e todas as rebarbas eliminadas. Todas as estrias resultantes, por exemplo, de operações de rectificação, apenas podem ser paralelas às tensões.</p>
125		<p>5) Corte autogéneo automático, com linhas de fusão pouco profundas e regulares ou corte autogéneo manual, com posterior eliminação de qualquer defeito de bordo. Qualidade do corte autogéneo automático de acordo com a EN 1090.</p>	<p><u>Pormenores 4) e 5):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Os cantos reentrantes são melhorados por meio de rectificação (inclinação $\leq \frac{1}{4}$) ou a verificação é feita utilizando os factores de concentração de tensões adequados. - Não existem reparações por reenchimento da soldadura.
100 m = 5		<p>6) e 7) Produtos laminados ou extrudidos como nos pormenores 1), 2), 3).</p>	<p><u>Pormenores 6) e 7):</u></p> <p>$\Delta\tau$ calculado a partir de:</p> $\tau = \frac{V S(t)}{I t}$
Para os pormenores 1 – 5 de aços resistentes às condições atmosféricas, utilizar a categoria imediatamente inferior.			

Tabela B.1 – Elementos não soldados e elementos com ligações mecânicas (Continuação) Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

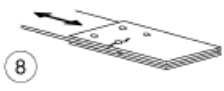
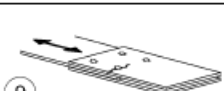
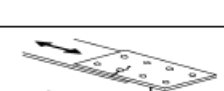
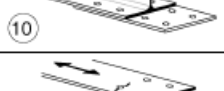
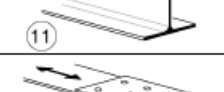

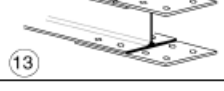
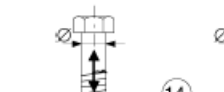


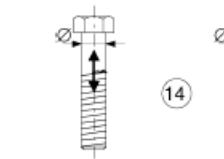
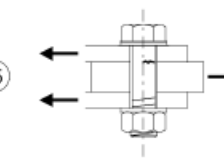
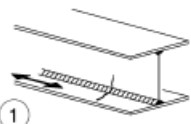
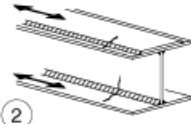
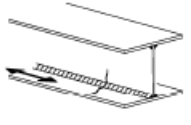
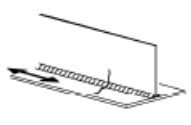
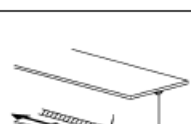

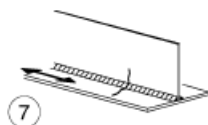
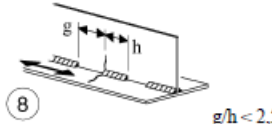
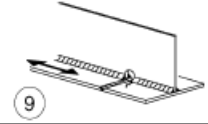
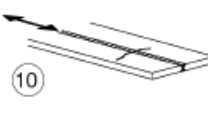

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
112		8) Ligação com dupla sobreposição e parafusos de alta resistência pré-esforçados.	8) $\Delta\sigma$ a calcular sobre a secção bruta.
		8) Ligação com dupla sobreposição e parafusos injectados pré-esforçados.	8) ... secção bruta.
		9) Ligação com dupla sobreposição e parafusos ajustados.	9) ... secção útil.
		9) Ligação com dupla sobreposição e parafusos injectados não pré-esforçados.	9) ... secção útil.
90		10) Ligação de simples sobreposição e parafusos de alta resistência pré-esforçados.	10) ... secção bruta.
		10) Ligação de simples sobreposição e parafusos injectados pré-esforçados.	10) ... secção bruta.
		11) Elemento estrutural com furação e solicitado à flexão e ao esforço normal.	11) ... secção útil.
80		12) Ligação de simples sobreposição e parafusos ajustados.	12) ... secção útil.
		12) Ligação de simples sobreposição e parafusos injectados não pré-esforçados.	12) ... secção útil.
50		13) Ligação de simples ou dupla sobreposição e parafusos não pré-esforçados em furação normal. Não existe inversão de esforços.	13) ... secção útil.
50	efeito de dimensão para $t > 30$ mm: $k_t = (30/t)^{0.25}$ 	14) Parafusos e varões traccionados com roscas laminadas ou executadas por corte. Para grandes diâmetros (cavilhas de fixação), o efeito de dimensão é tido em conta com k_t .	14) $\Delta\sigma$ calculado em relação à secção traccionada não roscada do parafuso. São tidas em conta a flexão e a tracção resultantes do efeito de alavanca e as tensões de flexão resultantes de outros efeitos. Para os parafusos pré-esforçados, poderá ser tida em conta a redução do intervalo de tensões.
100 m=5		<u>Parafusos solicitados ao corte simples ou duplo</u> O plano de corte não passa pela parte roscada 15) - Parafusos ajustados. - Parafusos correntes sem inversão de esforços (parafusos das classes 5.6, 8.8 ou 10.9).	15) $\Delta\tau$ calculado em relação à secção da espiga do parafuso.

Tabela B.2 – Secções compostas soldadas (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
125	 	<u>Soldaduras longitudinais contínuas:</u> 1) Soldadura automática ou totalmente mecânica de topo executada em ambos os lados. 2) Soldadura automática ou totalmente mecânica de ângulo. Extremidades das chapas de recobrimento a verificar de acordo com o pormenor 6) ou 7) do Quadro 8.5.	<u>Pormenores 1) e 2):</u> Não é permitida qualquer paragem/recomeço da soldadura excepto no caso em que a reparação é executada por um especialista e a execução correcta da reparação é controlada por inspecção.
112	 	3) Soldadura automática ou totalmente mecânica de ângulo ou de topo executada nos dois lados, mas com paragem/recomeço. 4) Soldadura automática ou totalmente mecânica de topo executada apenas num dos lados, com uma contrachapa contínua no lado oposto, sem paragem/recomeço.	4) No caso em que este pormenor apresentar traços de paragem/recomeço utiliza-se a categoria 100.
100	 	5) Soldadura manual de ângulo ou de topo. 6) Soldadura manual, automática ou totalmente mecânica de topo executada apenas num dos lados, em particular nas vigas em caixão.	5), 6) É essencial um muito bom ajustamento entre as chapas do banzo e da alma. O bordo da alma é preparado de forma a garantir na sua base uma penetração regular e sem interrupção da soldadura.
100		7) Reparação de uma soldadura manual, automática ou totalmente mecânica de ângulo ou de topo para as categorias 1) a 6).	7) Uma rectificação executada por um especialista para eliminação de todos os traços de defeitos e um controlo adequado podem restaurar a categoria original.
80		8) Soldadura de ângulo longitudinal descontínua.	8) $\Delta\sigma$ é baseado na tensão normal no banzo.
71		9) Soldadura de topo longitudinal, soldadura de ângulo ou soldadura descontínua com entalhe na intersecção de altura não superior a 60 mm. Para um entalhe na intersecção de altura > 60 mm, ver o pormenor 1) no Quadro 8.4.	9) $\Delta\sigma$ é baseado na tensão normal no banzo.
125		10) Soldadura de topo longitudinal, aplanada de ambos os lados por máquina paralelamente à direcção do esforço, controlo 100 % NDT.	
112		10) Sem rectificação nem paragem/recomeço.	
90		10) Com posições de paragem/recomeço.	
140		11) Soldadura longitudinal automática ou totalmente mecânica em secções tubulares sem paragem/recomeço.	11) Espessura da parede $t \leq 12,5$ mm.
125		11) Soldadura longitudinal automática ou totalmente mecânica em secções tubulares sem paragem/recomeço.	11) Espessura da parede $t > 12,5$ mm.
90		11) Com paragem/recomeço da soldadura.	

Para os pormenores 1 a 11 executados com soldadura totalmente mecânica, aplicam-se as categorias da soldadura automática.

Tabela B.3 – Soldaduras transversais de topo (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

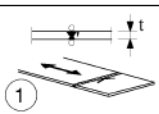
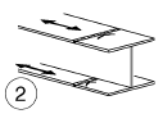
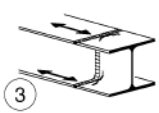

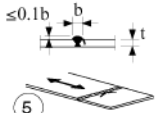
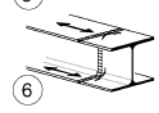
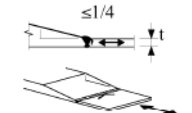

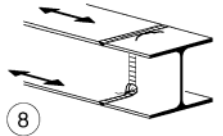
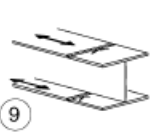
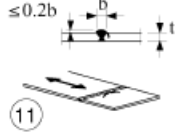

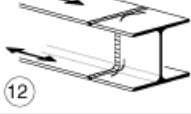



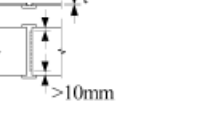


Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
112	   	<p><u>Sem contrachapa de apoio:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Emendas transversais de chapas e barras. 2) Emendas de banzo e de alma de vigas compostas antes da sua construção. 3) Emendas com soldaduras de topo da secção total de perfis laminados sem entalhes nas intersecções. 4) Emendas transversais de chapas ou barras de largura ou espessura variáveis, com uma inclinação $\leq 1/4$. 	<ul style="list-style-type: none"> - Todas as soldaduras aplanadas por máquina até à face da superfície da chapa paralelamente à direcção da seta. - Postiços de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas aplanados por máquina na direcção das tensões. - Soldadura nos dois lados; controlada por NDT. <p><u>Pormenor 3):</u> Apenas para secções laminadas, cortadas e soldadas.</p>
90	   	<ol style="list-style-type: none"> 5) Emendas transversais de chapas ou barras. 6) Emendas com soldaduras de topo da secção total de perfis laminados sem entalhes nas intersecções. 7) Emendas transversais de chapas ou barras de largura ou espessura variáveis, com uma inclinação $\leq 1/4$. Transição das soldaduras maquinadas para eliminação dos entalhes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Altura da convexidade do cordão não superior a 10 % da largura do cordão, com transições suaves para a superfície da chapa. - Postiços de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas aplanados por máquina na direcção das tensões. - Soldadura nos dois lados; controlada por NDT. <p><u>Pormenores 5) e 7):</u> Soldaduras executadas na horizontal.</p>
90		<ol style="list-style-type: none"> 8) Como no pormenor 3) mas com entalhes na intersecção. 	<ul style="list-style-type: none"> - Todas as soldaduras aplanadas por máquina até à face da superfície da chapa paralelamente à direcção da seta. - Postiços de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas aplanados por máquina na direcção das tensões. - Soldadura nos dois lados; controlada por NDT. - Secções laminadas com as mesmas dimensões sem diferenças de tolerância.

Tabela B.4 – Soldaduras transversais de topo (continuação) (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
80	efeito de dimensão para $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$	  	9) Emendas transversais de vigas compostas soldadas sem entalhes nas intersecções. 10) Soldaduras de topo da secção total de perfis laminados com entalhes nas intersecções. 11) Emendas transversais de chapas, barras, secções laminadas ou vigas compostas.	<ul style="list-style-type: none"> - Altura da convexidade do cordão não superior a 20 % da largura do cordão, com transições suaves para a superfície da chapa. - Soldadura não aplanada por máquina. - Postiços de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas aplanados por máquina na direcção das tensões. - Soldadura nos dois lados; controlada por NDT. <p><u>Pormenor 10):</u> Altura da convexidade do cordão não superior a 10 % da largura do cordão, com transições suaves para a superfície da chapa.</p>
63			12) Emendas com soldaduras de topo da secção total de perfis laminados sem entalhes nas intersecções.	<ul style="list-style-type: none"> - Postiços de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas aplanados por máquina na direcção das tensões. - Soldada nos dois lados.
36			13) Soldaduras de topo executadas de um só lado.	13) Sem contrachapas de apoio.
71	efeito de dimensão para $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$		13) Soldaduras de topo executadas de um só lado unicamente quando a penetração total é verificada por meio de um controlo por NDT adequado.	
71	efeito de dimensão para $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$	 	<u>Com contrachapas de apoio:</u> 14) Emenda transversal. 15) Soldadura de topo transversal com largura ou espessura variável com uma inclinação $\leq 1/4$. Também válido para chapas curvas.	<u>Pormenores 14) e 15):</u> As soldaduras de ângulo que fixam a contrachapa de apoio terminam pelo menos a 10 mm dos bordos da chapa solicitada. Soldaduras de posição no interior da soldadura definitiva.
50	efeito de dimensão para $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$	 	16) Soldadura transversal de topo com contrachapa de apoio permanente, de largura ou espessura variável, com uma inclinação $\leq 1/4$. Também válido para chapas curvas.	16) As soldaduras de ângulo da contrachapa de apoio terminam a menos de 10 mm do bordo da chapa, ou não pode ser garantido um bom ajustamento.

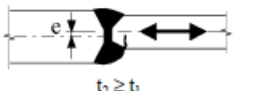
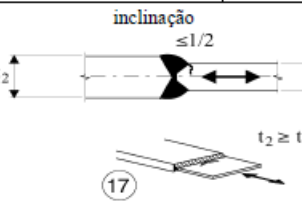
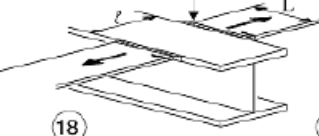
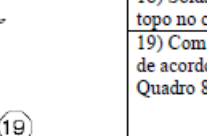
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
71	efeito de dimensão para $t > 25$ mm e/ou efeito de excentricidade: $k_s = \left(\frac{25}{t_1}\right)^{0.2} \sqrt{1 + \frac{6e}{t_1} \frac{t_1^{1.5}}{t_1^{1.5} + t_2^{1.5}}}$  $t_2 \geq t_1$		17) Soldadura transversal de topo, espessuras diferentes sem transição, folhetos médios alinhados.	
40			18) Soldadura transversal de topo no cruzamento de banzos.	<u>Pormenores 18) e 19)</u> A resistência à fadiga do componente contínuo tem de ser verificada com o Quadro 8.4, pormenor 4) ou pormenor 5).
Como o pormenor 4) do Quadro 8.4			19) Com raio de concordância de acordo com o pormenor 4) do Quadro 8.4.	

Tabela B.4 – Acessórios e reforços soldados (continuação) (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

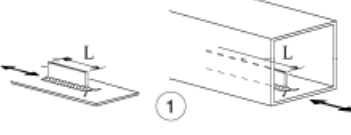
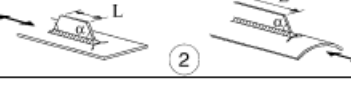
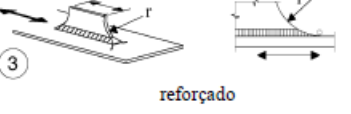
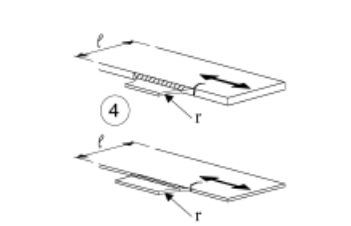

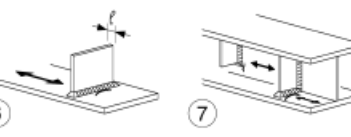
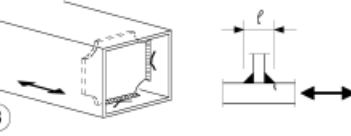
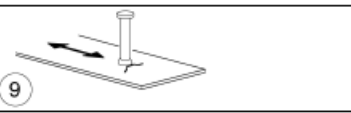
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
80	$L \leq 50 \text{ mm}$		<u>Acessórios longitudinais:</u> 1) A categoria dos pormenores varia com o comprimento do acessório, L.	Espessura do acessório inferior à sua altura. Caso contrário, ver o Quadro 8.5, pormenores 5) ou 6).
71	$50 < L \leq 80 \text{ mm}$			
63	$80 < L \leq 100 \text{ mm}$			
56	$L > 100 \text{ mm}$			
71	$L > 100 \text{ mm}$ $\alpha < 45^\circ$		2) Acessório longitudinal sobre uma chapa ou um tubo.	
80	$r > 150 \text{ mm}$	 reforçado	3) "Gousset" com raio de transição por soldadura de ângulo longitudinal à chapa ou ao tubo; extremidade do cordão de ângulo reforçada (penetração total); comprimento do cordão reforçado $\geq r$.	<u>Pormenores 3) e 4):</u> Raio de transição suave, r, executado por maquinagem ou corte autogéneo do "gousset" antes da sua soldadura, e posterior rectificação da soldadura paralelamente à direcção da seta de forma a eliminar completamente a extremidade do cordão transversal de soldadura.
90	$\frac{r}{\ell} \geq \frac{1}{3}$ ou $r > 150 \text{ mm}$		4) "Gousset" soldado ao bordo de uma chapa ou do banzo de uma viga.	
71	$\frac{1}{6} \leq \frac{r}{\ell} \leq \frac{1}{3}$			
50	$\frac{r}{\ell} < \frac{1}{6}$			
40			5) Soldadura bruta, sem raio de transição.	
80	$\ell \leq 50 \text{ mm}$		<u>Acessórios transversais:</u> 6) Soldados a uma chapa. 7) Reforços verticais soldados a uma viga laminada ou a uma viga composta.	<u>Pormenores 6) e 7):</u> As extremidades das soldaduras são cuidadosamente rectificadas para eliminar qualquer rebordo. 7) $\Delta\sigma$ calculado utilizando as tensões principais, caso o reforço termine na alma, ver lado esquerdo.
71	$50 < \ell \leq 80 \text{ mm}$		8) Diafragma de vigas em caixão soldado a um banzo ou a uma alma. Poderá não ser viável para secções tubulares pequenas. As categorias também são válidas para reforços em anel.	
80			9) Refere-se ao efeito no material de base dos conectores soldados.	

Tabela B.5 – Ligações soldadas de transmissão de esforços (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

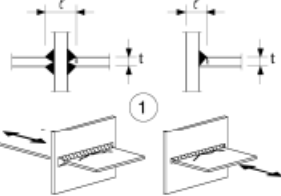

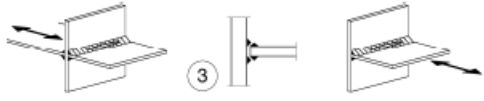
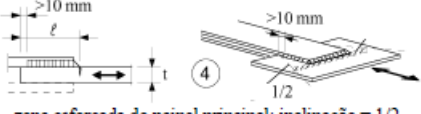
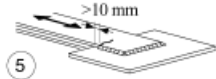
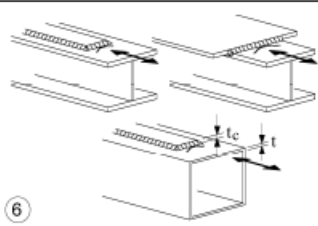
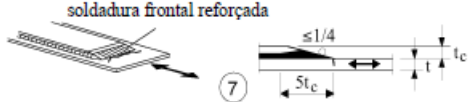
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
80	$\ell < 50 \text{ mm}$	qualquer t [mm]	 <p><u>Ligações em cruz e em T:</u></p> <p>1) Rotura da base em todas as soldaduras de topo com penetração total e em todas as juntas de penetração parcial.</p>	<p>1) Após inspeção, isentas de descontinuidades ou de defeitos de alinhamento fora das tolerâncias da EN 1090.</p> <p>2) Para o cálculo de $\Delta\sigma$, utiliza-se a tensão nominal modificada.</p> <p>3) Nas ligações de penetração parcial, são requeridas duas verificações da fadiga. Em primeiro lugar, avalia-se a fissuração da raiz de acordo com as tensões definidas na secção 5, utilizando a categoria 36* para $\Delta\sigma_w$ e a categoria 80 para $\Delta\sigma_w$. Em segundo lugar, avalia-se a fissuração superficial determinando $\Delta\sigma$ na chapa de apoio.</p>
71	$50 < \ell \leq 80$	qualquer t [mm]		
63	$80 < \ell \leq 100$	qualquer t [mm]		
56	$100 < \ell \leq 120$	qualquer t [mm]		
56	$\ell > 120$	$t \leq 20$		
50	$120 < \ell \leq 200$ $\ell > 200$	$t > 20$ $20 < t \leq 30$		
45	$200 < \ell \leq 300$ $\ell > 300$	$t > 30$ $30 < t \leq 50$		
40	$\ell > 300$	$t > 50$		
Como o pormenor 1) do Quadro 8.5	 <p>chapa flexível</p>		2) Rotura no bordo da base do acessório; a concentração de tensões nas extremidades das soldaduras é devida à flexibilidade da chapa de apoio.	<p><u>Pormenores 1) a 3):</u> A falta de alinhamento das chapas solicitadas não deverá exceder 15 % da espessura da chapa intermédia.</p>
36*			3) Rotura da base em soldaduras de topo em T com penetração parcial ou em soldaduras de ângulo e de topo em T, de acordo com a Figura 4.6 da EN 1993-1-8:2005.	
Como o pormenor 1) do Quadro 8.5	 <p>zona esforçada do painel principal: inclinação = 1/2</p>		<p><u>Ligações sobrepostas soldadas:</u></p> <p>4) Ligação sobreposta soldada com cordão de ângulo.</p>	<p>4) $\Delta\sigma$ na chapa principal calculado com base na área indicada no desenho.</p> <p>5) $\Delta\sigma$ calculado nas chapas sobrepostas.</p>
45*			<p><u>Chapa sobreposta:</u></p> <p>5) Ligação sobreposta soldada com cordão de ângulo.</p>	
	$t_c < t$	$t_c \geq t$		<p><u>Chapas de recobrimento sobre vigas laminadas e vigas compostas:</u></p> <p>6) Zonas de extremidade das chapas de recobrimento soldadas simples ou múltiplas, com ou sem soldadura frontal.</p>
56*	$t \leq 20$	-		
50	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$		
45	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$		
40	$t > 50$	$30 < t \leq 50$		
36	-	$t > 50$		
56	 <p>soldadura frontal reforçada</p>		<p>7) Chapas de recobrimento sobre vigas laminadas e vigas compostas.</p> <p>7t) $5t_c$ é o comprimento mínimo da soldadura reforçada.</p>	7) Soldadura frontal aplanada rectificadora à face. Além disso, se $t_c > 20 \text{ mm}$, a espessura da extremidade da chapa é rectificadora com uma inclinação < 1 em 4.

Tabela B.5 – Ligações soldadas de transmissão de esforços (continuação) (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

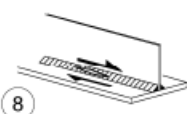
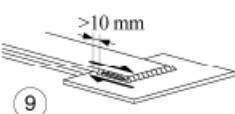
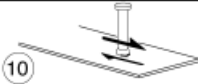
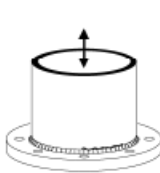
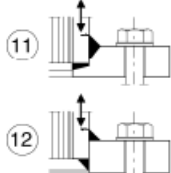
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
80 $m=5$	 	<p>8) Soldaduras de ângulo contínuas transmitindo corte, como nas soldaduras alma-banzo em vigas compostas.</p> <p>9) Ligação sobreposta soldada com cordão de ângulo.</p>	<p>8) $\Delta\tau$ calculado com base na área da secção bissectriz.</p> <p>9) $\Delta\tau$ calculado com base na área da secção bissectriz considerando o comprimento total da soldadura. Extremidades do cordão a mais de 10 mm do bordo da chapa, ver também 4) e 5) acima.</p>
ver a EN 1994-2 (90 $m=8$)		<p><u>Conectores de cabeça soldados:</u></p> <p>10) Para aplicações mistas</p>	<p>10) $\Delta\tau$ calculado a partir da secção transversal nominal do conector.</p>
71	 	<p>11) Ligação de um tubo a uma virola por soldaduras de topo com 80 % de penetração total.</p>	<p>11) Zona de concordância do cordão de soldadura rectificada. $\Delta\sigma$ calculado no tubo.</p>
40		<p>12) Ligação de um tubo a uma virola por soldaduras de ângulo.</p>	<p>12) $\Delta\sigma$ calculado no tubo.</p>

Tabela B.6 – Ligações tubulares ($t < 12,5$ mm) (continuação) (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

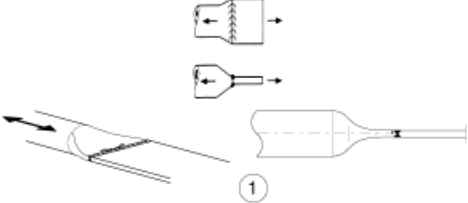

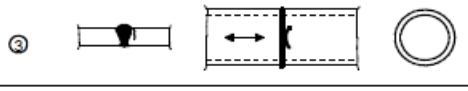
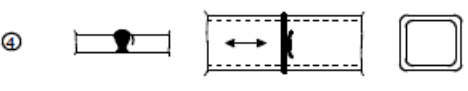
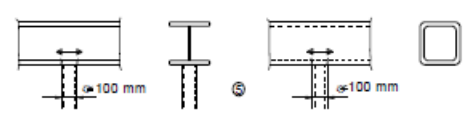
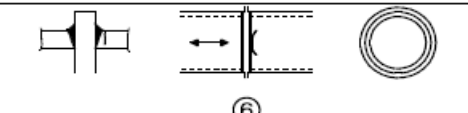
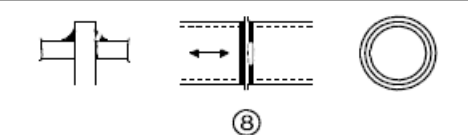
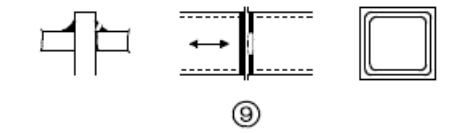
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
71		1) Ligação tubo-chapa, tubos achatados, soldadura de topo (chanfro em X).	1) $\Delta\sigma$ calculado no tubo. Válido apenas para tubos de diâmetro inferior a 200 mm.
71		2) Ligação tubo-chapa, tubo com entalhe e soldado à chapa. Furos na extremidade do entalhe.	2) $\Delta\sigma$ calculado no tubo. A fissuração por corte na soldadura deverá ser verificada utilizando o Quadro 8.5, pormenor 8).
63			
71		<u>Soldaduras transversais de topo:</u> 3) Ligações com soldaduras de topo de secções tubulares circulares.	<u>Pormenores 3) e 4):</u> - Convexidade da soldadura $\leq 10\%$ da largura da soldadura, com transições suaves.
56		4) Ligações com soldaduras de topo de secções tubulares rectangulares.	- Soldaduras executadas na horizontal, revelando-se, após inspeção, isentas de defeitos fora das tolerâncias da EN 1090. - Classificar 2 categorias de pormenores acima se $t > 8$ mm.
71		<u>Acessórios soldados:</u> 5) Secção tubular circular ou rectangular, com ligação a outra secção por soldadura de ângulo.	5) - Soldaduras que não transmitem esforços. - Largura paralela à direcção da tensão $\ell \leq 100$ mm. - Para outros casos, ver o Quadro 8.4.
50		<u>Emendas soldadas:</u> 6) Secções tubulares circulares, emendadas por soldaduras de topo numa chapa intermédia.	<u>Pormenores 6) e 7):</u> - Soldaduras de transmissão de esforços. - Soldaduras revelando-se, após inspeção, isentas de defeitos fora das tolerâncias da EN 1090.
45		7) Secções tubulares rectangulares, emendadas por soldaduras de topo numa chapa intermédia.	- Classificar 1 categoria de pormenores acima se $t > 8$ mm.
40		8) Secções tubulares circulares, emendadas por soldaduras de ângulo numa chapa intermédia.	<u>Pormenores 8) e 9):</u> - Soldaduras de transmissão de esforços. - Espessura da parede $t \leq 8$ mm.
36		9) Secções tubulares rectangulares, emendadas por soldaduras de ângulo numa chapa intermédia.	

Tabela B.6 – Nós de vigas reticuladas (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

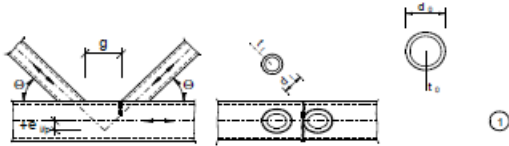

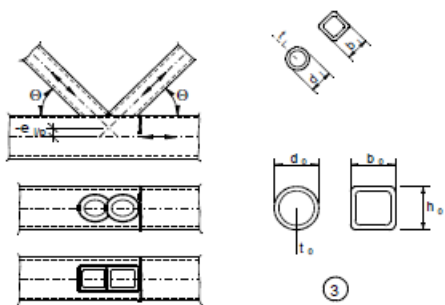
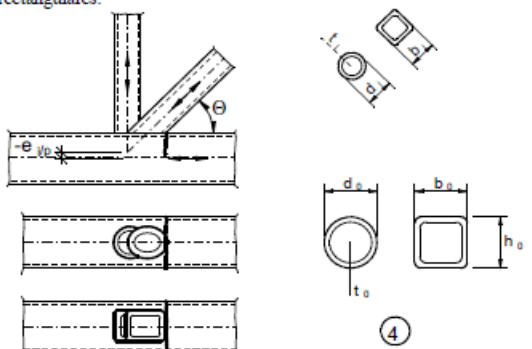
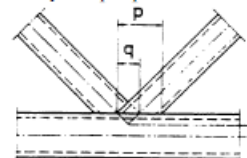
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Requisitos
90 m=5	<p>Ligações com afastamento: Pormenor 1): Ligações em K e em N, secções tubulares circulares:</p> 	<p><u>Pormenores 1) e 2):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Avaliações separadas para as cordas e os elementos diagonais. - Para valores intermédios da razão t_0/t_1, interpolar linearmente entre as categorias de pormenores. - São autorizadas soldaduras de ângulo em elementos diagonais com paredes de espessura $t \leq 8 \text{ mm}$. - t_0 e $t_1 \leq 8 \text{ mm}$ - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_0/t_0 \times t_0/t_1 \leq 25$ - $d_0/t_0 \times t_0/t_1 \leq 25$ - $0,4 \leq b/b_0 \leq 1,0$ - $0,25 \leq d/d_0 \leq 1,0$ - $b_0 \leq 200 \text{ mm}$ - $d_0 \leq 300 \text{ mm}$ - $-0,5h_0 \leq e_{op} \leq 0,25h_0$ - $-0,5d_0 \leq e_{op} \leq 0,25d_0$ - $e_{op} \leq 0,02b_0$ ou $e_{op} \leq 0,02d_0$ <p>[e_{op} é a excentricidade fora do plano]</p>
45 m=5	<p>$\frac{t_0}{t_1} = 1,0$</p>	
71 m=5	<p>Ligações com afastamento: Pormenor 2): Ligações em K e em N, secções tubulares rectangulares:</p> 	<p><u>Pormenor 2):</u></p> <p>$0,5(b_0 - b_1) \leq g \leq 1,1(b_0 - b_1)$ e $g \geq 2t_1$</p>
36 m=5	<p>$\frac{t_0}{t_1} = 1,0$</p>	
71 m=5	<p>Ligações com sobreposição: Pormenor 3): Ligações em K, secções tubulares circulares ou rectangulares:</p> 	<p><u>Pormenores 3) e 4):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - $30\% \leq \text{sobreposição} \leq 100\%$ - $\text{sobreposição} = (q/p) \times 100\%$ - Avaliações separadas para as cordas e os elementos diagonais. - Para valores intermédios da razão t_0/t_1, interpolar linearmente entre as categorias de pormenores. - São autorizadas soldaduras de ângulo em elementos diagonais com paredes de espessura $t \leq 8 \text{ mm}$. - t_0 e $t_1 \leq 8 \text{ mm}$ - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_0/t_0 \times t_0/t_1 \leq 25$ - $d_0/t_0 \times t_0/t_1 \leq 25$ - $0,4 \leq b/b_0 \leq 1,0$ - $0,25 \leq d/d_0 \leq 1,0$ - $b_0 \leq 200 \text{ mm}$ - $d_0 \leq 300 \text{ mm}$ - $-0,5h_0 \leq e_{op} \leq 0,25h_0$ - $-0,5d_0 \leq e_{op} \leq 0,25d_0$ - $e_{op} \leq 0,02b_0$ ou $e_{op} \leq 0,02d_0$ <p>[e_{op} é a excentricidade fora do plano]</p>
56 m=5	<p>$\frac{t_0}{t_1} = 1,0$</p>	
71 m=5	<p>Ligações com sobreposição: Pormenor 4): Ligações em N, secções tubulares circulares ou rectangulares:</p> 	<p>Definição de p e q:</p> 
50 m=5	<p>$\frac{t_0}{t_1} = 1,0$</p>	

Tabela B.7 – Tabuleiros ortotrópicos – Reforços de secção fechada (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

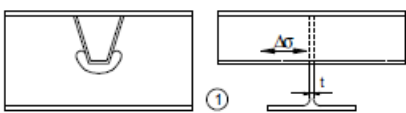

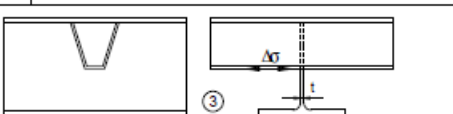
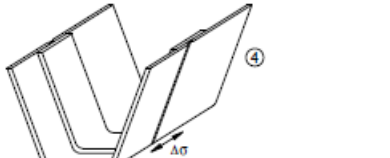
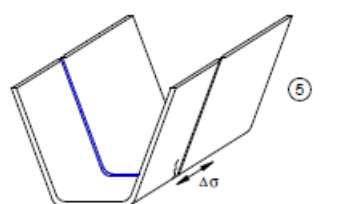
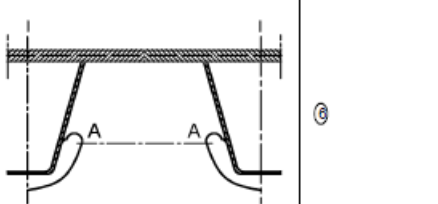
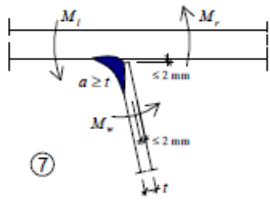
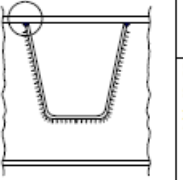
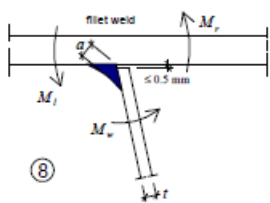
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
80	$t \leq 12 \text{ mm}$		1) Reforço longitudinal contínuo, com recorte adicional na carlinga.	1) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço longitudinal.
71	$t > 12 \text{ mm}$			
80	$t \leq 12 \text{ mm}$		2) Reforço longitudinal contínuo, sem recorte adicional na carlinga.	2) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço.
71	$t > 12 \text{ mm}$			
36			3) Reforço longitudinal descontinuo de ambos os lados da carlinga.	3) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço.
71			4) Junta no reforço, soldadura de topo com penetração total com contrachapa de apoio de aço.	4) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço.
112	Como os pormenores 1), 2), 4) no Quadro 8.3		5) Soldadura de topo com penetração total nos dois lados do reforço, sem contrachapa de apoio.	5) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço. Soldaduras provisórias no interior das soldaduras de topo.
90	Como os pormenores 5), 7) no Quadro 8.3			
80	Como os pormenores 9), 11) no Quadro 8.3			
71			6) Secção crítica entre recortes na alma de uma carlinga.	6) Avaliação baseada no intervalo de tensões na secção crítica tendo em conta os efeitos Vierendeel. NOTA: No caso de o intervalo de tensões ser determinado de acordo com a EN 1993-2, 9.4.2.2(3), poderá utilizar-se a categoria de pormenor 112.
71			<u>Soldadura de ligação da chapa do tabuleiro à nervura de secção trapezoidal ou em V</u> 7) Soldadura de penetração parcial com $a \geq t$.	7) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais de flexão na chapa.
50			8) Soldadura de ângulo ou soldaduras de penetração parcial não contemplada pelo pormenor 7).	8) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais de flexão na chapa.

Tabela B.7 – Tabuleiros ortotrópicos – Reforços de secção aberta (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

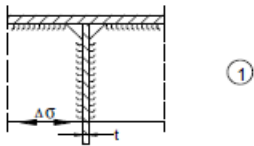
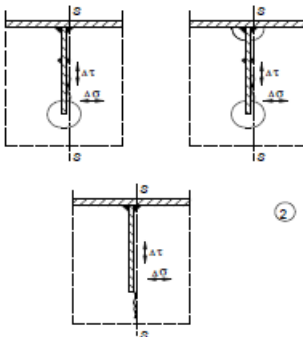
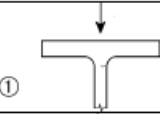
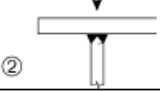
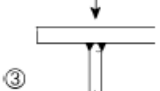
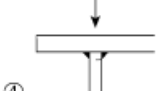
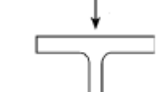
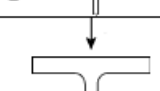

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
80	$t \leq 12 \text{ mm}$		1) Ligação de um reforço longitudinal a uma carlinga.	1) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço.
71	$t > 12 \text{ mm}$			
56			<p>2) Ligação de um reforço longitudinal contínuo a uma carlinga.</p> $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_s}{W_{\text{net},s}}$ $\Delta\tau = \frac{\Delta V_s}{A_{w,\text{net},s}}$ <p>Verificar também o intervalo de tensões entre reforços como definido na EN 1993-2.</p>	<p>2) Avaliação baseada na combinação do intervalo de tensões de corte $\Delta\tau$ e no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ na alma da carlinga, considerada como um intervalo de tensões equivalente:</p> $\Delta\sigma_{\text{eq}} = \frac{1}{2} \left(\Delta\sigma + \sqrt{\Delta\sigma^2 + 4\Delta\tau^2} \right)$

Figura B.8 – Ligações do banzo superior à alma de vigas de caminhos de rolamentos (Adaptado de EN1993-1-9 (2010))

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
160	① 	1) Seções laminadas em I ou em H.	1) Intervalo de tensões verticais de compressão $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na alma devido às cargas rolantes.
71	② 	2) Soldadura de topo em T com penetração total.	2) Intervalo de tensões verticais de compressão $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na alma devido às cargas rolantes.
36*	③ 	3) Soldaduras de topo em T com penetração parcial, ou soldadura de topo em T com penetração total eficaz em conformidade com a EN 1993-1-8.	3) Intervalo de tensões $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na secção bissectriz da soldadura devido à compressão vertical das cargas rolantes.
36*	④ 	4) Soldaduras de ângulo.	4) Intervalo de tensões $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na secção bissectriz da soldadura devido à compressão vertical das cargas rolantes.
71	⑤ 	5) Banzo em T com soldadura de topo em T com penetração total.	5) Intervalo de tensões verticais de compressão $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na alma devido às cargas rolantes.
36*	⑥ 	6) Banzo em T com soldadura de topo em T com penetração parcial, ou soldadura de topo em T com penetração total eficaz em conformidade com a EN 1993-1-8.	6) Intervalo de tensões $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na secção bissectriz da soldadura devido à compressão vertical das cargas rolantes.
36*	⑦ 	7) Banzo em T com soldaduras de ângulo.	7) Intervalo de tensões $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na secção bissectriz da soldadura devido à compressão vertical das cargas rolantes.

ANEXO C – PARECER DA EMPRESA IDEAM S.A.

Estimados miembros del tribunal:

Como tutor del Trabajo de Fin de Master de Luis Matos, espero poder transmitirles el valor académico de su proyecto y la utilidad profesional que de él se deriva.

Desde el punto de vista estrictamente académico, este trabajo ha permitido profundizar en las bases teóricas del fenómeno de la fatiga y su tratamiento normativo con carácter amplio, integral y riguroso. Se ha logrado agrupar en un solo documento la metodología de análisis de fatiga de puentes metálicos y mixtos, barriendo los siguientes aspectos:

- Los fundamentos de la mecánica de la fractura en metales que permiten entender mejor el daño por fatiga.
- -El enfoque que la normativa (EN 1991-2, EN 1993-1-9, EN 1992-2, EN 1993-2 y EN-1994) proporciona en cuanto al fenómeno en sí, las acciones aplicables, los criterios de verificación y la caracterización de los detalles.
- -En lo referente a las acciones, se han aclarado las condiciones de aplicabilidad de cada modelo de carga de fatiga y su incidencia en el diseño de puentes metálicos. En este sentido, es destacable el estudio comparativo realizado entre el FLM3 y FLM4 para entender mejor las calibraciones efectuadas en la etapa de redacción del Eurocódigo 1.
- -En lo tocante a los formatos de seguridad, se ha efectuado un análisis crítico del método simplificado y se han identificado sus aspectos dudosos o contradictorios, llegando a proponer métodos alternativos basados en el contraste con el método del daño acumulado.
- -En lo relativo a la comprobación de elementos concretos, se ha centrado la atención en los detalles más comunes de la construcción metálica y mixta, poniéndolos en contexto al estudiar estructuras reales. Se trata de una aportación muy importante ya que las tablas del Eurocódigo 3 pueden conducir a dudas de interpretación y, para un mismo punto de control, pueden ofrecer diferentes categorías debido a la concurrencia de diferentes detalles. Por lo tanto, esta labor de estudio de los detalles pensando en las partes que los constituyen, todo ello dentro de una estructura real, permite poner de relieve la importancia de su concepción y la complejidad de su análisis al tener que coordinar diferentes detalles.

Precisamente este último motivo enlaza con la relevancia profesional del trabajo de Luis. Todo este conocimiento teórico, ya de por sí valioso y poco común, se ha puesto en práctica estudiando global y localmente las tipologías más comunes de puentes de carretera metálicos y mixtos en España, pues sólo así es posible percibir la sensibilidad de estas estructuras al fenómeno de la fatiga. En particular, el estudio de sensibilidad ha cubierto:

- Tanto en global (longitudinal) como en local (transversal), se ha establecido una metodología de análisis coherente y conducente a aislar la influencia de la fatiga: diseño óptimo conforme a Eurocódigos y comprobaciones de fatiga mediante el método simplificado (si es aplicable) y el del daño acumulado.
- En longitudinal, se han analizado puentes cajón isostáticos, cajones continuos de 3 vanos y tableros bijácena continuos de tres vanos. Esta selección corresponde a las soluciones más frecuentes en tipología mixta.
- En todos estos casos se ha trabajado un rango de luces suficientemente significativo como para establecer comparaciones relevantes entre el método simplificado y el del daño acumulado.

- En los tableros continuos se ha analizado, por un lado, la influencia de la luz del vano lateral y, por otro, la sensibilidad de las diferentes zonas y elementos: centros de vanos, apoyos intermedios, conexión y armadura pasiva longitudinal.
- En transversal, se han tratado los elementos normalmente empleados para la inyección de cargas de tráfico excéntricas en el mecanismo resistente longitudinal: celosías verticales (tableros cajón de 1 o 2 carriles), costillas en voladizo (tableros cajón de 3 carriles) y costillas con puntales (tableros cajón de 2 carriles por sentido). Este estudio, de nuevo, ayuda a tener una perspectiva amplia de la respuesta en términos de fatiga de una gran variedad de elementos transversales.
- Dado que cada solución es propia de un ancho tipo de tablero (con muy poca variación), la principal variable de estudio en transversal ha sido el espaciamiento entre elementos, lo que ha permitido detectar el máximo interese que hace que la fatiga no sea condicionante frente a un diseño optimizado.

Como conclusión de todo lo anterior, este Trabajo de Fin de Master ha sido un proyecto doblemente ventajoso: Luis ha afianzado su formación básica de análisis de estructuras metálicas y mixtas, ha accedido a un conocimiento complejo pero cada vez más necesario y ha desarrollado herramientas de cálculo útiles tanto para sus estudios como para la práctica habitual de Ideam. Por su parte, Ideam ha profundizado su conocimiento estratégico de un fenómeno poco tratado hasta fechas recientes y comúnmente atribuido a puentes de ferrocarril. Los análisis críticos de la normativa y los estudios de sensibilidad nos han ayudado a comprender mejor la fatiga como fenómeno físico y como área de diseño, así como a detectar la sensibilidad de los puentes metálicos y mixtos de carretera que habitualmente se diseñan en España.

Este trabajo es una muestra de la posibilidad de enriquecimiento mutuo gracias a la colaboración entre el mundo investigador y el profesional, ambos implicados en la excelencia y el desarrollo del conocimiento.

Reciban un cordial saludo,

Jorge Nebreda Sánchez

Jefe de Proyectos

Ideam, S.A.